



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES**

KELVIA SILVA BARROS

**ESTUDO DE CINZAS VOLANTES DE UMA TERMELÉTRICA DA REGIÃO
METROPOLITANA DE FORTALEZA-CE PARA APLICAÇÃO EM CAMADAS
GRANULARES DE PAVIMENTOS**

FORTALEZA

2015

KELVIA SILVA BARROS

ESTUDO DE CINZAS VOLANTES DE UMA TERMELÉTRICA DA REGIÃO
METROPOLITANA DE FORTALEZA-CE PARA APLICAÇÃO EM CAMADAS
GRANULARES DE PAVIMENTOS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

Orientadora: Profa. Dra. Suelly Helena de Araújo Barroso.

FORTALEZA

2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

B278e Barros, Kelvia Silva.
Estudo de cinzas volantes de uma Termelétrica da Região Metropolitana de Fortaleza-CE para aplicação em camadas granulares de pavimentos. / Kelvia Silva Barros. – 2015.
143 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2015.
Orientação: Profa. Dra. Suelly Helena de Araújo Barroso.

1. Pavimentação. 2. Termelétrica. 3. Cinza volante. 4. Estabilização. I. Título.

CDD 388

KELVIA SILVA BARROS

ESTUDO DE CINZAS VOLANTES DE UMA TERMELÉTRICA DA REGIÃO
METROPOLITANA DE FORTALEZA-CE PARA APLICAÇÃO EM CAMADAS
GRANULARES DE PAVIMENTOS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

Aprovada em: 12/08/2015.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr^a. Suelly Helena de Araújo Barroso (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Ernesto Ferreira Nobre Júnior
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr^a. Michéle Dal Toé Casagrande
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC - Rio)

A Deus.

E aos meus amores, minha filha Iza Arrebol e
meu marido Walter Kelton.

AGRADECIMENTOS

A Deus, primeiramente. Por ter permitido que 2015 fosse o meu ano. Ano de grandes realizações pessoais e profissionais.

À SRMA/DNIT, na pessoa do Sr. Natan Borges, por não ter me impedido que eu pudesse terminar minha pós-graduação e ter compreendido os justificáveis afastamentos e à senhorita Denyse Brito, um anjo que encontrei no sudeste do Maranhão, muito obrigada por fazer meus dias melhores. Sem você, a UL-01 pára!

Aos engenheiros da Termelétrica Energia Pecém, Sr. Márcio Aguiar e Sr. Bruno Medeiros, que permitiram todas as coletas de cinza, sempre que precisei. Obrigada pelo apoio e atenção.

À minha orientadora, Dra. Suelly Barroso, não me canso de dizer o quanto a admiro como mulher, profissional, mãe e esposa. Um dia, quem sabe, eu chego lá!

Aos meus professores do Petran, obrigada por contribuírem na minha formação durante esses anos.

Aos meus laboratoristas, Anselmo e, em especial, ao meu querido Rômulo Jácome, você faz toda a diferença dentro deste laboratório. Conte comigo pro que der e vier!

Às minhas amigas, Maria, Karine, Cecília, Camila, Paloma e Liliana, que mesmo à distância, sempre desejaram-me o melhor e aconselharam-me pelas melhores decisões.

Aos amigos que adquiri no Petran, não citarei todos os nomes, mas alguns deles contribuíram diretamente neste trabalho, em especial, à Juceline Bastos, Reuber Freire e Júnior Ribeiro, bem como as meninas que sempre torcem por mim, como a Viviane Falcão e Edjane Soares.

Aos meus familiares, que por deveras vezes, tiveram que conviver e entender as minhas ausências.

Ao meu colega de trabalho, meu amigo, meu compadre, Isael Cavalcante, obrigada pela orientação durante a graduação e por continuar me orientando em certas situações da vida.

E, por último e não menos importante (senão o mais!) ao meu marido, Walter Kelton, sem você, certamente essa pesquisa teria outro rumo. Esse trabalho também é seu! Muito obrigada pelo seu apoio e dedicação. Amo você não somente por isso, mas também por ter me dado o presente mais nobre do ano, o de ser mãe.

“Bom mesmo é ir à luta com determinação,
abraçar a vida com paixão, perder com classe e
vencer com ousadia, pois o triunfo pertence a
quem se atreve...
A vida é muita para ser insignificante.”

Charles Chaplin

RESUMO

A presente dissertação buscou verificar a possibilidade do aproveitamento das cinzas volantes de carvão mineral advindas de uma termelétrica da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), para aplicação em camadas granulares de pavimentos. Foram realizados ensaios de caracterização física, mecânica e ambiental das cinzas (classificadas como não inertes) e de um solo local, bem como de misturas estabilizadas granulometricamente (solo+cinza) e misturas estabilizadas quimicamente (solo+cinza+cal). De posse dos resultados dos ensaios mecânicos das misturas estabilizadas granulometricamente (solo puro, 3 misturas de 30%, 50%, 70% de cinza e a cinza pura), foram escolhidas duas misturas (cinza pura e 50%cinza+50%solo) para serem estabilizadas com 5% de cal. Essas misturas foram avaliadas em diferentes tempos de cura (0, 7, 14 e 28 dias) para os ensaios de Índice de Suporte Califórnia (CBR), Módulo de Resiliência (MR), Resistência à Compressão Simples (RCS) e Resistência à Tração (RT). Foi escolhida a melhor mistura (95%cinza+5%cal) para ser comparada com uma camada de base de uma estrutura de pavimento asfáltico da BR-222 de um trecho monitorado. A partir de análises numéricas com o programa CAP3D, as duas estruturas foram comparadas quanto às deflexões ocorridas no topo do pavimento, deformações horizontais na fibra inferior das camadas asfálticas e tensões verticais no topo do subleito. Os resultados obtidos, a partir do programa experimental desenvolvido para a região e solos estudados, encorajam o emprego das cinzas volantes em camadas granulares dos pavimentos.

Palavras chave: Pavimentação, Termelétrica, Cinza Volante, Estabilização.

ABSTRACT

This dissertation aimed to evaluate the possibility of reusing fly ash coming from a thermoelectric in the Metropolitan Region of Fortaleza, Brazil, for application in pavement unbound layers. Physical, mechanical, and environmental characterization tests were performed in a local soil, in the ash (classified as a non-inert material), as well in graded stabilized mixtures (soil+ash) and chemically stabilized mixtures (soil+ash+lime). With the results of mechanical tests obtained for the graded stabilized mixtures (soil material, 3 mixtures with 30%, 50%, and 70% of ash, and pure ash), two mixtures were also stabilized with 5% of hydrated lime. These mixtures were evaluated at different curing times (0, 7, 14, and 28 days) by means of California Bearing Ratio (CBR) test, Resilient Modulus (RM), Unconfined Compression Strength (UCS) and Indirect Tensile Strength (ITS). The mixture with the most appropriate characteristics (95% of ashes+5% of hydrated lime) was chosen in order to be compared with a base layer of an asphalt pavement structure on the Brazilian highway BR-222, in a monitored experimental road section. By means of numerical analyses using the CAP3D software, these two structures were compared regarding the deflections occurring on the pavement surface, the horizontal strain at the bottom of the asphalt layer, and the vertical stresses on the top of the subgrade. The results obtained with the experimental program, which was developed for the specific region and soil materials studied in this research, encourage the use of fly ashes in pavement unbound layers.

Keywords: Paving, Thermoelectric, Fly Ash, Stabilization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Capacidade instalada de geração elétrica no Brasil em MW.....	25
Figura 2 –	Região Metropolitana de Fortaleza – RMF.	27
Figura 3 –	Região Metropolitana de Fortaleza após Governo de Cid Gomes (2014).	28
Figura 4 –	Organização das Termelétricas Energia Pecém e Pecém II.....	29
Figura 5 –	Esteira transportadora de carvão instalada do Porto do Pecém até a Termelétrica Energia Pecém.	32
Figura 6 –	Esteiras transportadoras de carvão instaladas dentro da termelétrica para levar os carvões aos silos, onde o combustível é pulverizado e preparado para posterior queima.....	33
Figura 7 –	Esquema de produção de energia de uma termelétrica.	34
Figura 8 –	Transporte da cinza até a célula sendo realizada por caminhões.	35
Figura 9 –	Verticalização da 1ª célula de armazenamento de cinzas da termelétrica e 2ª célula ainda não utilizada.	36
Figura 10 –	Termelétrica Energia Pecém.	37
Figura 11 –	Localização da termelétrica Energia Pecém.	38
Figura 12 –	Ciclo do processo de geração e transmissão de energia de uma termelétrica...	39
Figura 13 –	Esquema da evolução do carvão quanto ao desenvolvimento do mineral.	41
Figura 14 –	Geração de Energia Elétrica Mundial por fonte em 2011.....	42
Figura 15 –	Curvas granulométricas das cinzas pesadas das amostras coletadas em três usinas distintas.	59
Figura 16 –	Detalhe dos limites da Termelétrica Energia Pecém, acesso pela CE-085 (destacada em azul).....	64
Figura 17 –	Localização da Termelétrica Energia Pecém em relação à cidade de Fortaleza.	65
Figura 18 –	Aspecto visual da cinza volante coletada na Termelétrica Energia Pecém.	65
Figura 19 –	Delimitação da área de escolha do solo estudado na pesquisa com a RMF antiga.....	66
Figura 20 –	Mapa indicando a predominância de cada tipo de solo segundo a classificação AASTHO dentro da região destacada de escolha do solo para composição das misturas.	66
Figura 21 –	Distância da jazida até o centro de Caucaia.	68
Figura 22 –	Localização da jazida com as suas coordenadas.....	68
Figura 23 –	Aspecto visual do solo A-2-4 localizado no município de Caucaia.	68
Figura 24 –	Materiais utilizados: Solo, Cinza Volante e Cal.	71
Figura 25 –	Preparação das misturas.....	72
Figura 26 –	Fluxograma do programa experimental realizado.	73

Figura 27 –	Cilindro tripartido utilizado para moldagem de CPs para os ensaios de MR, RCS e RT.	76
Figura 28 –	Equipamento triaxial de carga repetida do Brasil.	77
Figura 29 –	Tensões aplicadas ao CP e comportamento do mesmo (deformação recuperável) diante dessas tensões, além do cálculo de MR.	77
Figura 30 –	Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT) em CPs cilíndricos.....	79
Figura 31 –	Curva granulométrica do solo de Caucaia.	82
Figura 32 –	Resultados do ensaio de compactação para o Solo de Caucaia.	83
Figura 33 –	Comportamento do MR do solo de Caucaia usando o modelo composto.	85
Figura 34 –	Aspecto do solo de Caucaia antes e depois da imersão de 24 horas.....	85
Figura 35 –	Segregação da cinza volante impossibilitando a realização do ensaio de LL... 86	
Figura 36 –	Segregação da cinza volante impossibilitando a realização do ensaio do LP... 87	
Figura 37 –	Resultados do ensaio de sedimentação para a Cinza Volante.....	87
Figura 38 –	Resultados do ensaio de compactação para a Cinza Volante.	88
Figura 39 –	Comportamento do MR da cinza volante estudada usando o modelo composto.	90
Figura 40 –	CP de cinza volante antes e depois de ser imerso em água para os ensaios de RCS e RT.	91
Figura 41 –	Curvas de compactação das misturas Solo+Cinza.....	95
Figura 42 –	Comparação dos CBR's (sem cura e com imersão de 96 horas) obtidos das Misturas Solo+Cinza em diferentes teores.	96
Figura 43 –	Comparação dos MR's imediatos (sem cura) obtidos das misturas Solo+Cinza.	98
Figura 44 –	Curva de compactação da Mistura M3Cal.....	101
Figura 45 –	Curva de compactação da Mistura M5Cal.....	101
Figura 46 –	Comparação dos valores de CBR das misturas Solo+Cinza e Solo+Cinza+Cal sob efeito de cura imediata e imersão de 96 horas.....	103
Figura 47 –	Comparação dos valores de CBR das misturas M3Cal e M5Cal sob efeito dos tempos de cura.	104
Figura 48 –	Variação dos valores de CBR das misturas M3Cal e M5Cal sob efeito dos tempos de cura analisados de forma isolada empregando-se gráfico de barras.	105
Figura 49 –	Comparação dos valores dos CBR's das misturas M5Cal e M3Cal sob efeito dos tempos de cura de forma conjunta empregando-se gráfico de linhas.....	105
Figura 50 –	Variação dos valores de MR da mistura M3Cal sob efeito dos tempos de cura.	106
Figura 51 –	Variação dos valores de MR da mistura M5Cal sob efeito dos tempos de cura.	107

Figura 52 –	Comparação dos valores de MR das misturas M3Cal e M5Cal para 0 dias de cura.....	108
Figura 53 –	Comparação dos valores de MR das misturas M3Cal e M5Cal para 7 dias de cura.....	108
Figura 54 –	Comparação dos valores de MR das misturas M3Cal e M5Cal para 14 dias de cura.....	109
Figura 55 –	Comparação dos valores de MR das misturas M3Cal e M5Cal para 28 dias de cura.....	109
Figura 56 –	Variação dos valores de RCS das Misturas M5Cal e M3Cal com os tempos de cura.....	113
Figura 57 –	Variação dos valores de RT das Misturas M5Cal e M3Cal com os tempos de cura.....	113
Figura 58 –	Aspecto dos CPs (que não resistiram à imersão) das misturas M3Cal e M5Cal antes e depois de serem imersos em água para os ensaios de RCS e RT.	114
Figura 59 –	Aspecto dos CPs das misturas Solo+Cinza+Cal submetidos ao ensaio de RCS.	114
Figura 60 –	Aspecto dos CPs das misturas Solo+Cinza+Cal submetidos ao ensaio de RT.	114
Figura 61 –	Tensões Verticais x Profundidade da estrutura BR-222 (real) e da estrutura com base M5Cal.	117
Figura 62 –	Deformações Horizontais x Profundidade da estrutura BR-222 (real) e da estrutura com base M5Cal.	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Geração elétrica por fonte no Brasil (GWh – gigawatts.hora).....	26
Tabela 2 –	População e consumo per capita entre os anos de 2009 a 2013.....	31
Tabela 3 –	Composição das misturas idealizadas por Barros (2011).	52
Tabela 4 –	Composição das misturas idealizadas por Farias (2005) com seus respectivos CBRs.	56
Tabela 5 –	Composição das misturas confeccionadas por Marcon em 1977.	57
Tabela 6 –	Classificação de solos TRB - AASHTO (<i>Transportation Research Board - American Association of State Highway and Transportation Officials</i>).	67
Tabela 7 –	Composição química da cal utilizada na pesquisa fornecida pelo fabricante. ...	69
Tabela 8 –	Composição das misturas para se avaliar o efeito da estabilização granulométrica.	70
Tabela 9 –	Ensaio realizado no solo de Caucaia.....	74
Tabela 10 –	Resultados em percentual da análise granulométrica do solo de Caucaia.	82
Tabela 11 –	Diferentes modelos de MR testados para o solo de Caucaia investigada.	84
Tabela 12 –	Resultados em percentual da análise granulométrica da Cinza Volante.....	87
Tabela 13 –	Diferentes modelos de MR testados para a cinza volante investigada.	90
Tabela 14 –	Resultados do ensaio de Extrato Solubilizado da Cinza Volante.	92
Tabela 15 –	Resumo dos resultados das compactações das misturas Solo+Cinza.	95
Tabela 16 –	Resumo dos resultados das compactações das misturas de Lopes (2011).	96
Tabela 17 –	Resumo dos resultados das expansões das misturas Solo+Cinza.	97
Tabela 18 –	Coefficientes do modelo composto para MR aplicado às misturas Solo+Cinza.	98
Tabela 19 –	Resumo da nova nomenclatura e composição das duas misturas com cal.	100
Tabela 20 –	Resumo dos resultados das compactações das misturas estabilizadas granulometricamente e quimicamente.	102
Tabela 21 –	Resumo dos resultados dos CBR's das misturas Solo+Cinza+Cal sob efeito de cura.....	102
Tabela 22 –	Resumo dos resultados dos CBR's das misturas investigadas por Farias (2005).	103
Tabela 23 –	Coefficientes do modelo composto para cálculo do MR das misturas Solo+Cinza+Cal.....	107
Tabela 24 –	Resultados do ensaio de RCS das misturas Solo+Cinza+Cal sob efeito de cura.	110
Tabela 25 –	Resultados do ensaio de RT das misturas Solo+Cinza+Cal sob efeito de cura.	110
Tabela 26 –	Dados das camadas de uma estrutura asfáltica analisadas no CAP3D.	116

Tabela 27 – Comparação dos pontos críticos analisados pelo CAP3D das estruturas de bases BGS e M5Cal.	118
--	-----

LISTA DE SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highways and Transportation Officials</i>
ABCM	Associação Brasileira de Carvão Mineral
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Aneel	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN	Balanço Energético Nacional
BGS	Brita Graduada Simples
BID	Banco Interamericano de Desenvolvimento
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CBR	<i>California Bearing Ratio</i> (Índice de Suporte Califórnia)
CBUQ	Concreto Asfáltico Usinado à Quente
CGH	Central Geradora Hidrelétrica
CIPP	Complexo Industrial e Portuário do Pecém
COGERH	Companhia de Recursos Hídricos
DEPT-CE	Departamento de Edificações, Rodovias e Transporte do Estado do Ceará
DET	Departamento de Transportes
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EDP	Energias de Portugal
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FAO	Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
FWD	<i>Falling Weight Deflectometer</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IP	Índice de Plasticidade
IPECE	Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará
IPLANCE	Instituto de Planejamento do Estado do Ceará
LL	Limite de Liquidez
LMP	Laboratório de Mecânica dos Pavimentos
LP	Limite de Plasticidade
MR	Módulo de Resiliência

MS	Ministério da Saúde
NBR	Norma Brasileira
OMS	Organização Mundial de Saúde
PAC	Programa de Aceleração do Crescimento
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
RCS	Resistência à Compressão Simples
RMF	Região Metropolitana de Fortaleza
RT	Resistência à Tração
SCDP	Solo Contaminado por Derivados de Petróleo
SEINFRA	Secretaria da Infraestrutura do Ceará
SIN	Sistema Interligado Nacional
TRB	<i>Transportation Research Board</i>
UFC	Universidade Federal do Ceará
UTE	Usina termelétrica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Considerações Iniciais	18
1.2	Problema de Pesquisa	20
1.3	Justificativa	21
1.4	Objetivos	21
1.4.1	<i>Objetivo Geral</i>	21
1.4.2	<i>Objetivos Específicos</i>	21
1.5	Metodologia	22
1.6	Estrutura da Dissertação	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1	Considerações Iniciais	24
2.2	Breve Cenário Socioeconômico e Energético do Brasil e do Ceará	24
2.2.1	<i>Cenário do Brasil</i>	24
2.2.2	<i>Cenário do Ceará</i>	27
2.2.3	<i>A Termelétrica Energia Pecém</i>	32
2.3	O Processo Produtivo de uma Termelétrica	38
2.3.1	<i>Informações Sobre o Carvão como Fonte de Energia</i>	40
2.3.2	<i>Principais Resíduos Gerados nas Termelétricas</i>	43
2.4	Estabilização de um Solo para Finalidades Rodoviárias	45
2.4.1	<i>Estabilização Mecânica</i>	45
2.4.2	<i>Estabilização Granulométrica</i>	46
2.4.3	<i>Estabilização Química</i>	47
2.5	Estabilização Química com o uso da Cal	47
2.5.1	<i>A Cal como Agente Estabilizante</i>	47
2.5.2	<i>Alguns Estudos sobre o Emprego da Cal na Área de Pavimentação</i>	50
2.6	A Técnica de Encapsulamento e alguns Estudos	52
2.7	Alguns Estudos Nacionais sobre o Emprego de Cinzas de Carvão Mineral	58
2.8	Considerações Finais	62
3	MATERIAIS E MÉTODOS	64
3.1	Considerações Iniciais	64
3.2	Materiais Empregados	64
3.2.1	<i>Cinza Volante de Carvão</i>	64
3.2.2	<i>Solo da RMF</i>	65
3.2.3	<i>Estabilizante</i>	69
3.3	Definição das Misturas Realizadas	69
3.4	Programa Experimental	71
3.4.1	<i>Preparação das misturas</i>	71
3.4.2	<i>Fluxograma do Programa Experimental</i>	72
3.5	Ensaio Realizados no Solo Natural	74
3.6	Ensaio Realizados na Cinza Volante	74
3.6.1	<i>Ensaio Mecânicos de Caracterização</i>	74
3.6.2	<i>Ensaio Ambientais – Extrato Lixiviado e Extrato Solubilizado</i>	75
3.7	Ensaio Realizados nas Misturas	75
3.7.1	<i>Compactação</i>	75
3.7.2	<i>Índice de Suporte de Califórnia – CBR</i>	75
3.7.3	<i>Módulo de Resiliência - MR</i>	76

3.7.4	<i>Resistência à Compressão Simples – RCS</i>	78
3.7.5	<i>Resistência à Tração por compressão diametral – RT</i>	78
3.8	Análise da Melhor Mistura no CAP3D	79
3.9	Considerações Finais	80
4	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	81
4.1	Considerações Iniciais	81
4.2	Resultados dos Ensaios Realizados no Solo Natural de Caucaia	81
4.2.1	<i>Densidade Real e Limites de Atterberg do Solo de Caucaia</i>	81
4.2.2	<i>Granulometria do Solo de Caucaia</i>	82
4.2.3	<i>Curva de Compactação do Solo de Caucaia</i>	83
4.2.4	<i>CBR do Solo de Caucaia</i>	83
4.2.5	<i>MR do Solo de Caucaia</i>	84
4.2.6	<i>RCS e RT do Solo de Caucaia</i>	85
4.3	Resultados dos Ensaios Realizados na Cinza Volante (CV)	86
4.3.1	<i>Densidade Real e Limites de Atterberg da Cinza Volante</i>	86
4.3.2	<i>Granulometria da Cinza Volante</i>	87
4.3.3	<i>Curva de Compactação da Cinza Volante</i>	88
4.3.4	<i>CBR da Cinza Volante</i>	89
4.3.5	<i>MR da Cinza Volante</i>	89
4.3.6	<i>RCS e RT da Cinza Volante</i>	90
4.3.7	<i>Extrato Lixiviado e Extrato Solubilizado da Cinza Volante</i>	91
4.4	Resultados dos Ensaios Realizados nas Misturas Solo+Cinza	94
4.4.1	<i>Compactação das Misturas Solo+Cinza</i>	94
4.4.2	<i>CBR das Misturas Solo+Cinza</i>	96
4.4.3	<i>MR das Misturas Solo+Cinza</i>	97
4.4.4	<i>RCS e RT das Misturas Solo+Cinza</i>	99
4.4.5	<i>Escolha das Melhores Misturas Solo+Cinza</i>	99
4.5	Resultados dos Ensaios Realizados nas Misturas Solo+Cinza+Cal	100
4.5.1	<i>Compactação das Misturas Solo+Cinza+Cal</i>	100
4.5.2	<i>CBR das Misturas Solo+Cinza+Cal</i>	102
4.5.3	<i>MR das Misturas Solo+Cinza+Cal</i>	106
4.5.4	<i>RCS e RT das Misturas Solo+Cinza+Cal</i>	110
4.5.5	<i>Escolha da “melhor” Mistura Solo+Cinza+Cal para Aplicação na Pavimentação</i>	115
4.6	Análise da “Melhor Mistura” no CAP3D	116
4.7	Considerações Finais	119
5	CONCLUSÃO	120
5.1	Considerações Iniciais	120
5.2	Principais Conclusões	120
5.2.1	<i>Conclusões quanto ao Solo Natural de Caucaia Estudado</i>	120
5.2.2	<i>Conclusões quanto à Cinza Volante Estudada</i>	121
5.2.3	<i>Conclusões quanto às Misturas Solo+Cinza Estudadas</i>	122
5.2.4	<i>Conclusões quanto à escolha das Melhores Misturas Solo+Cinza</i>	123
5.2.5	<i>Conclusões quanto às Misturas Solo+Cinza+Cal Estudadas</i>	124
5.2.6	<i>Conclusões quanto à Escolha da “melhor” Mistura Solo+Cinza+Cal para Aplicação na Pavimentação</i>	125
5.2.7	<i>Conclusões quanto à Análise da “Melhor Mistura” no CAP3D</i>	126
5.3	Principais Sugestões e Recomendações para Estudos Futuros	127

REFERÊNCIAS	128
ANEXO – ENSAIOS DE EXTRATOS LIXIVIADO E SOLUBILIZADO REALIZADO NA CINZA VOLANTE PROVENIENTE DA TERMELÉTRICA ENERGIA PECÉM.....	135

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

Na construção das camadas granulares dos pavimentos são utilizados materiais como areias naturais, areias artificiais, pedregulho natural, seixo britado, dentre outros. Porém esses materiais estão cada vez mais difíceis de serem encontrados na natureza, tornando necessário o desenvolvimento de estudos no sentido de encontrar soluções para essa escassez.

Em paralelo à falta de materiais convencionais para a construção dos pavimentos, grandes volumes de resíduos são originados no processo produtivo industrial, ocasionando problemas com relação à sua disposição final. Sabe-se que há uma carência de áreas apropriadas para a destinação final adequada desses rejeitos, como por exemplo áreas para construção de aterros.

Diante do panorama de intensos investimentos econômicos no setor industrial, é esperado que, com o aumento da capacidade produtiva haja, conseqüentemente, o crescimento da geração de resíduos. A escassez de materiais para a pavimentação somada à carência de áreas para disposição dos resíduos incentiva o desenvolvimento de estudos que possam auxiliar na solução desse problema.

Dentre as principais indústrias, a termelétrica é um dos tipos que merece atenção por gerar resíduos oriundos da queima de um determinado combustível, sendo estes, em sua maioria, resíduos não-inertes ou perigosos. Assim, técnicas devem ser desenvolvidas e aprimoradas visando proporcionar uma destinação correta, minimizando os impactos causados ao meio ambiente. Conforme a classificação da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), os danos causados à natureza variam com a periculosidade dos materiais descartados.

Alguns autores relatam a importância da incorporação dos rejeitos gerados ao meio ambiente de forma sustentável. Fonseca (2003) destaca que é imprescindível o reuso de resíduos (em geral), não devendo simplesmente estocá-los de forma temporária por razões econômicas, ambientais e por indisponibilidade de área. Devem ser utilizadas técnicas que permitam a utilização desses rejeitos sem que ocorram impactos negativos ao meio ambiente. Assim, a disposição das cinzas deve ser feita obedecendo aos limites estabelecidos pelos órgãos reguladores.

Diante do volume de resíduos que é gerado pelas indústrias termelétricas, principalmente as que se utilizam do carvão mineral como matéria-prima para combustível,

juntamente com a escassez de materiais convencionais para a pavimentação, a termelétrica Energia Pecém, juntamente com a Universidade Federal do Ceará (UFC), investiga soluções para a incorporação das cinzas na área de pavimentação.

Os resíduos desta termelétrica são produzidos através do processo de geração de energia elétrica através da queima do carvão mineral. Os resíduos mais densos, por causa da gravidade, ficam no fundo da caldeira onde são coletados e são chamados de cinzas pesadas ou *bottom ash*. Atualmente, boa parte dessas cinzas é coletada e aproveitada para a produção de cimento por uma cimenteira da região próxima à termelétrica Energia Pecém, o que sobra é estocado nas células de armazenamento.

A cinza leve ou *fly ash* também é estocada em duas células de armazenamento. Tendo em vista o aumento da produção das cinzas, a primeira célula foi verticalizada, aumentando-se assim sua capacidade em 60% do volume inicial que era de 220 mil m³. Após a verticalização, a capacidade da célula aumentou para um pouco mais de 350 mil m³ de volume (informação verbal)¹.

A termelétrica Energia Pecém, juntamente com a UTE Pecém II (UTE – Usina termelétrica), possuem 3 unidades geradoras de energia. Cada unidade produz diariamente um volume de 300 toneladas de cinza leve e 100 a 150 toneladas de cinza pesada, totalizando em torno de 1200 a 1350 toneladas de cinzas. Diante do cenário apresentado e com relação à gestão de resíduos sólidos (onde o gerador é responsável pela destinação final do resíduo), um dos desafios enfrentados é encontrar uma alternativa viável tecnicamente, economicamente e ambientalmente para o destino final dessas cinzas. Uma possibilidade para o emprego desses resíduos pode ser o uso da técnica de estabilização de solos, por meio do encapsulamento de constituintes possivelmente contaminantes.

A estabilização de solos consiste em procedimentos de natureza física, físico-química, química ou mecânica, visando a melhoria e estabilidade das propriedades dos solos quanto à aplicação na engenharia. Em outras palavras, significa conferir ao solo a capacidade de resistir e suportar as cargas e os esforços induzidos pelo tráfego normalmente aplicados sobre o pavimento e às ações erosivas dos agentes naturais sob as condições mais adversas de solicitação consideradas no projeto.

Já o encapsulamento promove a diminuição da superfície de contato do contaminante existente no resíduo com o meio ambiente, diminuindo assim, seu possível efeito poluidor. Após o estudo das técnicas citadas, é possível que a pavimentação possa ser

¹ Informações fornecidas pelo Engenheiro Químico Márcio M. de Aguiar, gerente de sustentabilidade da Eneva.

utilizada como meio para incorporação de resíduos, dando a esses um destino não prejudicial ao meio ambiente e sendo uma alternativa à escassez de materiais convencionais na área. Porém, para que possam ser empregados corretamente na área, os resíduos devem ser submetidos a uma avaliação técnica e ambiental.

Nesse contexto, acredita-se que os resíduos provenientes das termelétricas movidas à carvão mineral possam ser utilizados na construção de rodovias, tanto no revestimento como em camadas granulares, desde que sejam desenvolvidas pesquisas que comprovem a viabilidade técnica, ambiental e econômica (se possível) do emprego dos mesmos na área da pavimentação.

1.2 Problema de Pesquisa

Grandes volumes de materiais são utilizados nos serviços de pavimentação, porém nem sempre é possível encontrar materiais que se enquadrem nos parâmetros exigidos pelas normas de engenharia. Em paralelo a essa realidade, grandes volumes de resíduos são originados dos processos industriais, acarretando no acúmulo elevado dos mesmos, já que a produção é bem maior do que as alternativas de destinação final para incorporação dos rejeitos.

Na tentativa de minimizar a carência de materiais na pavimentação e diminuir o montante expressivo dos resíduos estocados, uma alternativa seria aplicar resíduos industriais em camadas dos pavimentos. Essa inserção dos resíduos deverá ser feita de forma a não comprometer o meio ambiente nem a função estrutural do pavimento.

Neste contexto, o problema desta pesquisa se resume na deficiência, quanto à quantidade e qualidade, dos materiais convencionais aplicados na pavimentação. Com base nessa problemática, foi investigado um material alternativo, uma cinza volante de carvão mineral proveniente de uma termelétrica situada na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), para aplicação em camadas granulares de pavimentos.

Como citado anteriormente, a usina termelétrica chega a gerar cerca de 1200 a 1350 toneladas de cinzas por dia e embora algumas empresas já estejam utilizando parte dessas cinzas em sua produção, o volume é tão grande que ainda há a necessidade de desenvolver estudos que objetivem encontrar alternativas para a incorporação de cinzas nos mais diversos processos.

1.3 Justificativa

Com a carência de materiais convencionais empregados na pavimentação, o desenvolvimento de uma dada região fica comprometido, já que a infraestrutura é componente importante no crescimento de um local. Assim, é necessário que hajam materiais que possam substituir os materiais convencionalmente utilizados na construção dos pavimentos. Dessa forma, estudos devem ser desenvolvidos no sentido de aprimorar as técnicas existentes para a incorporação e melhor aproveitamento dos resíduos, como por exemplo os das termelétricas, na pavimentação. Essa área por movimentar grandes volumes de solo, se apresenta como alternativa para a inserção da cinza na estrutura do pavimento, seja no revestimento ou em camadas granulares.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Geral

O objetivo geral da pesquisa é verificar a possibilidade do aproveitamento das cinzas volantes provenientes de uma termelétrica situada na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF) para o uso em camadas granulares dos pavimentos.

1.4.2 Objetivos Específicos

- a) Verificar a classificação ambiental da cinza leve proveniente da termelétrica situada na RMF.
- b) Avaliar as propriedades mecânicas de misturas solo+cinza (100%, 70%, 50% e 30%) para aplicação em camadas granulares dos pavimentos.
- c) Verificar se a cal comum pode ser empregada e se é eficaz no processo de estabilização química das misturas solo+cinza.
- d) Verificar qual mistura possui melhor desempenho quanto à estabilização química com a inserção da cal para aplicação na pavimentação.
- e) Avaliar o comportamento das misturas solo+cinza+cal com diferentes tempos de cura (0, 7, 14, 28 dias).
- f) Analisar uma estrutura real no CAP3D e compará-la com uma nova estrutura substituindo sua base por uma que contenha cinza volante em sua composição.

1.5 Metodologia

Com a finalidade de se atingir os objetivos descritos, geral e específicos, algumas etapas foram necessárias, tais como:

- a) realizar uma revisão bibliográfica sobre os assuntos relevantes ao tema em estudo, sendo esses: a geração de resíduos pela indústria termelétrica, a técnica de encapsulamento de contaminantes como alternativa para a inserção desse resíduo, bem como a estabilização química de solos utilizando cal;
- b) coletar a cinza volante, solo natural e adquirir a cal a ser utilizada no programa experimental;
- c) realizar os ensaios de caracterização na cinza volante e solo natural;
- d) realizar os ensaios de resistência mecânica para o solo natural e para as misturas produzidas em laboratório (solo+cinza volante e solo+cal+cinza volante);
- e) compilar e analisar os resultados obtidos nos ensaios propostos;
- f) analisar uma estrutura de pavimentos com o emprego das cinzas;

1.6 Estrutura da Dissertação

A dissertação está organizada e estruturada em cinco capítulos.

O Capítulo 1 apresenta a problemática acerca do tema estudado, fazendo uma breve apresentação deste, sendo também apresentados o problema de pesquisa, justificativa, objetivos, metodologia e estruturação da pesquisa.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre os assuntos abordados na pesquisa. Apresenta algumas informações sobre o carvão, matéria-prima de uma termelétrica, o cenário sócio-energético do Brasil e do Ceará, bem como sua expansão e como este se apresentará nos próximos anos. O capítulo também traz algumas definições, descrevendo a técnica de estabilização, encapsulamento e solo-cal, dado que a cal é o agente encapsulante utilizado nessa pesquisa. Além disso, o capítulo cita, também, alguns estudos com a utilização de resíduos na pavimentação, especialmente estudos que envolvem cinzas volantes e pesadas.

O Capítulo 3 mostra os materiais e métodos utilizados na pesquisa, sendo detalhado o procedimento experimental usado, bem como algumas considerações sobre a geração das cinzas volantes na termelétrica Energia Pecém.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos através dos ensaios realizados, sendo estes dispostos em tabelas e gráficos. Este capítulo também apresenta a discussão dos resultados.

O Capítulo 5 resume as principais conclusões do estudo, bem como apresenta sugestões e recomendações para pesquisas e trabalhos futuros.

No Anexo são mostrados os resultados dos ensaios de Extrato Lixiviado e Extrato Solubilizado da cinza volante fornecidos pela empresa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo serão apresentados alguns conceitos acerca das termelétricas à carvão, de seus resíduos gerados, da classificação destes e das técnicas aplicadas para a inserção e melhor aproveitamento dos mesmos, dando destaque à técnica de estabilização e encapsulamento que foram utilizadas nesta pesquisa. Também será descrito o processo de produção da cinza volante, bem como mencionados alguns estudos envolvendo a aplicação de cinzas na área rodoviária.

2.2 Breve Cenário Socioeconômico e Energético do Brasil e do Ceará

2.2.1 *Cenário do Brasil*

Segundo informações obtidas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) do ano de 2015, o Brasil possui atualmente quase 204,5 milhões de brasileiros e o estado do Ceará mais de 8,8 milhões de cearenses, significando assim, que quanto mais a população cresce, maior é o consumo em vários setores, um deles é o de energia elétrica no país e no estado.

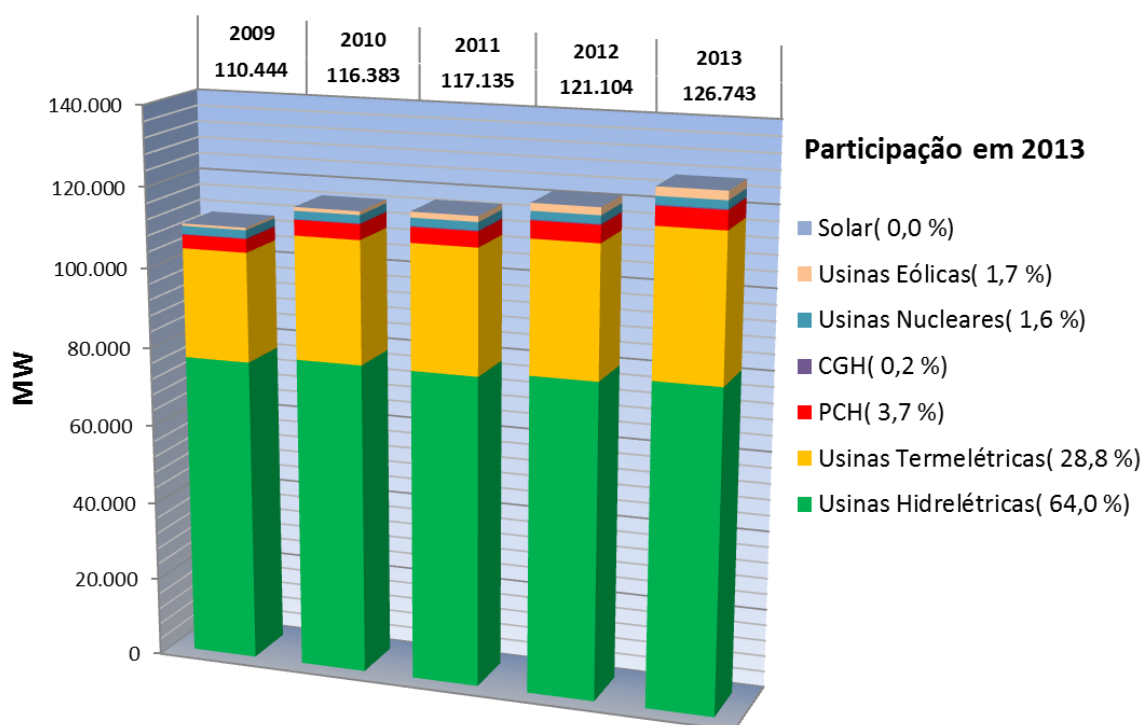
Os governos têm se organizado no sentido de atender a demanda consumidora e ano após ano foram instaladas usinas de geração elétrica com diferentes fontes de matérias-primas: usinas solares, usinas eólicas, usinas nucleares, CGH's¹ e PCH's² que significam centrais geradoras hidrelétricas e pequenas centrais hidrelétricas, respectivamente, usinas termelétricas e usinas hidrelétricas.

Segundo o Anuário Estatístico de Energia Elétrica de 2014 elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a capacidade de potência instalada para geração de energia elétrica no Brasil, aumentou quase 16.300 MW (megawatts) nos últimos 5 anos (2009-2013), conforme mostra a Figura 1.

¹ CGH significa Central Geradora Hidrelétrica, com potência instalada de até 1.000 kW (1 MW). Necessitam apenas de um simples registro para funcionar.

² PCH significa Pequena Central Hidrelétrica, usinas com potência instalada superior a 1 MW e igual ou inferior a 30 MW e com o reservatório com área igual ou inferior a 3 Km².

Figura 1 – Capacidade instalada de geração elétrica no Brasil em MW.



Fonte: Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2014; Elaboração EPE.

Como pode ser visualizado na Figura 1, a capacidade de geração de energia aumentou nos últimos anos. Além disso, segundo o Anuário Estatístico de Energia Elétrica de 2014, as usinas termelétricas que se utilizam de carvão mineral como sua fonte de matéria-prima, aumentaram sua capacidade de geração elétrica em 75,7% em 2013 em relação à geração de 2012, ou seja, foi a fonte mais utilizada em 2013 seguida do gás natural que aumentou em 47,6%.

Já as usinas hidrelétricas diminuíram em 5,9%, a capacidade de geração de energia elétrica produzidas em 2013 em relação à geração produzida em 2012, mas ainda mantendo a maior participação na geração da energia total, possuindo 68,6% em 2013, conforme pode ser visualizado na Tabela 1. Outra fonte que também houve sua utilização reduzida na capacidade de geração de energia elétrica produzidas em 2013 em relação à geração produzidas em 2012, foi a nuclear, havendo um déficit de 8,7%, porém igualando a porcentagem de participação na geração da energia total com o carvão, 2,6% no ano de 2013, também expostos na Tabela 1.

Tabela 1 - Geração elétrica por fonte no Brasil (GWh – gigawatts.hora).

	2009	2010	2011	2012	2013	$\Delta\%$ (2013/2012)	Part. % (2013)
Total	466.158	515.799	531.758	552.498	570.025	3,2	100,0
Gás Natural	13.332	36.476	25.095	46.760	69.003	47,6	12,1
Hidráulica (i)	390.988	403.290	428.333	415.342	390.992	-5,9	68,6
Derivados de Petróleo (ii)	12.724	14.216	12.239	16.214	22.090	36,2	3,9
Carvão	5.429	6.992	6.485	8.422	14.801	75,7	2,6
Nuclear	12.957	14.523	15.659	16.038	14.640	-8,7	2,6
Biomassa (iii)	21.851	31.209	31.633	34.662	39.679	14,5	7,0
Eólica	1.238	2.177	2.705	5.050	6.576	30,2	1,2
Outras (iv)	7.640	6.916	9.609	10.010	12.244	22,3	2,1

Fonte: Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2014; Elaboração EPE.

Notas:

i) Inclui autoprodução

ii) Derivados de petróleo: óleo diesel e óleo combustível

iii) Biomassa: lenha, bagaço de cana e lixo

iv) Outras: recuperações, gás de coqueria e outros secundários

Segundo a Associação Brasileira de Carvão Mineral (ABCM), a maioria das reservas do Brasil são reservas de carvão mineral do tipo linhito (maioria dos estados), ocorrendo os tipos sub-betuminoso e betuminoso na região sul do país com ocorrência em São Paulo. Atualmente há registros de cerca de 32 bilhões de toneladas das reservas de carvão e essas estão localizadas em sua maior parte (89,25%) no Rio Grande do Sul, nas regiões de Candiota, Baixo Jacuí e litoral, seguida da reserva localizada em Santa Catarina (10,41%) (ABCM, 2014).

As menores reservas encontram-se no Paraná (0,32%) e São Paulo (0,02%), além de Minas Gerais, Bahia, Pernambuco, Piauí, Maranhão, Pará, Amazonas e Acre, sendo que, nestes últimos, a quantidade é economicamente pouco relevante. A ABCM calcula que as reservas conhecidas poderiam gerar hoje 17.000 MW ou 17 GW (gigawatts) (ABCM, 2014), potência que poderia abastecer 85 mil casas de consumo médio residencial mensal de 200 kWh (kilowatts.hora) (padrão classe média) durante um mês.

Todas as reservas citadas acima são reservas provadas. Reserva provada é um conceito que determina o quanto de produto ainda está disponível para exploração levando-se em consideração a tecnologia existente, análise de dados geológicos e de engenharia, a viabilidade financeira e o marco regulatório de cada país.

Segundo o site Portal Brasil do Governo (www.brasil.gov.br/infraestrutura), as reservas provadas no país, situadas na região sul, são suficientes para 500 anos. Investimentos vêm sendo realizados em desenvolvimento tecnológico, focados na redução de impurezas, na

diminuição de emissões das partículas com nitrogênio e enxofre (NO₂ e SO₂) e na redução da emissão de CO₂ (dióxido de carbono), por meio da captura e armazenamento de carbono.

2.2.2 Cenário do Ceará

Segundo dados da Secretaria da Infraestrutura do Ceará (SEINFRA) no ano de 2014, o estado dispõe de 22 empreendimentos de geração de energia elétrica, totalizando 708.420 kW (kilowatts) de potência instalada, distribuídos em 1 pequena central hidrelétrica, 3 eólicas e 18 térmicas, situadas na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF).

A RMF situa-se ao nordeste do estado do Ceará. A população perfaz um total de 3.818.380 habitantes em 2014, sendo uma das dez maiores áreas urbanas do Brasil e a terceira mais populosa do Norte-Nordeste, atrás apenas da Grande Salvador e do Grande Recife, segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e do Instituto de Planejamento do Estado do Ceará (IPLANCE), ambos de 2014.

Os municípios que formam a RMF são: Fortaleza, Caucaia, Maranguape, Maracanaú, Pacatuba, Guaiúba, Itaitinga, Aquiraz, Eusébio, Chorozinho, Horizonte, Pacajús, Pindoretama, Cascavel e São Gonçalo do Amarante, conforme mostra a Figura 2, mas em 2014 foram incluídas, pelo governo de Cid Gomes, as cidades de Paracuru, Paraipaba, Trairi e São Luís do Curu, totalizando assim, 19 municípios (Figura 3).

Figura 2 – Região Metropolitana de Fortaleza – RMF.



Fonte: IBGE e IPECE, 2014.

Figura 3 – Região Metropolitana de Fortaleza após Governo de Cid Gomes (2014).



Fonte: pet.arquitetura.ufc.br de acordo com cidades.ce.gov.br, 2014.

No município de São Gonçalo do Amarante, encontra-se o Distrito do Pecém, o mais importante distrito deste município, por ser responsável pelo desenvolvimento do Complexo Industrial e Portuário Mário Covas, ou Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), como é popularmente conhecido. O CIPP abriga o porto, principal porta de entrada e saída de produtos no Ceará e líder nacional em movimentação de frutas e calçados, o segundo em transporte de algodão e o terceiro em produtos siderúrgicos (portalpecem.com.br, 2014).

Das empresas instaladas no CIPP, as usinas termelétricas UTE Pecém II e Energia Pecém (onde a sigla UTE deriva de Unidade Termo-Elétrica que agora se escreve “Termelétrica”), utilizam-se de carvão mineral como combustível para geração de energia, produzindo assim, grandes quantidades de cinzas como resíduo, cinzas volantes e cinzas pesadas, a primeira sendo objeto de estudo desta pesquisa.

A Usina Termelétrica Energia Pecém, também conhecida como UTE Pecém I, está localizada no CIPP, no município de São Gonçalo do Amarante, nas margens da rodovia CE-085, Km 37. O empreendimento é fruto de uma parceria entre a EDP Energias do Brasil (EDP – Energias de Portugal) e a MPX Energia (atual Eneva), com um investimento total de R\$ 3 bilhões, onde contou com o financiamento de R\$ 1,4 bilhão do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) e R\$ 556 milhões referente ao Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID) (portalpecem.com.br, 2014).

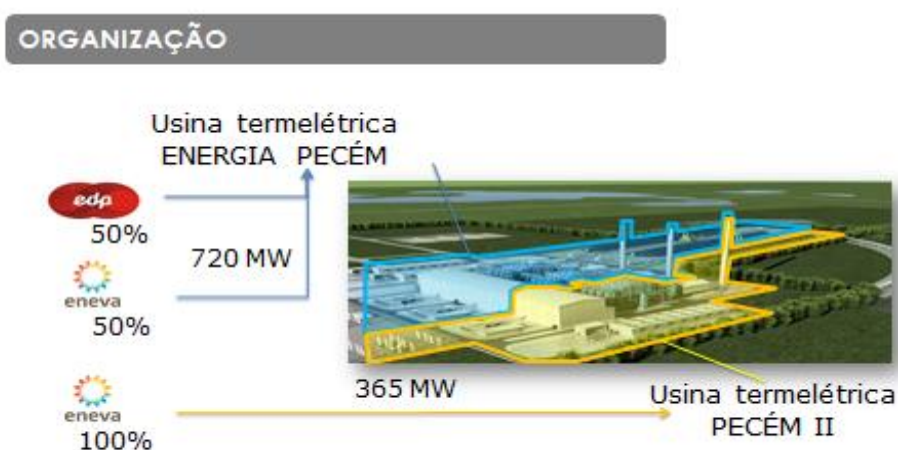
Iniciada em julho de 2008, é uma das obras do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), do Governo Federal. A termelétrica visa suprir o crescimento da

demanda no consumo de energia elétrica da região Nordeste e do Sistema Interligado Nacional (SIN). Permitirá ainda que o Ceará aumente sua produção de energia em 90%, passando para a posição de exportador de energia no lugar de importador (portalpecem.com.br, 2014).

A Energia Pecém foi concebida a partir de um projeto que prevê a minimização dos impactos ambientais, além do uso de alta tecnologia para tornar o processo mais limpo e eficiente. A empresa recebeu a autorização da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) para iniciar a operação comercial de sua primeira unidade geradora, com capacidade instalada de 360 MW, em 1º de dezembro de 2012. Já a segunda unidade geradora começou a operar comercialmente no dia 10 de maio de 2013, com mais 360 MW.

Atualmente, a Energia Pecém juntamente com a UTE Pecém II operam com três unidades geradoras de energia, cada uma com potência em torno de 360 MW, sendo 720 MW da Energia Pecém (2 unidades) e 365 MW da UTE Pecém II (1 unidade). Dessas três unidades, duas delas foram construídas em parceria *fifty-fifty*, ou seja, cinquenta-cinquenta em porcentagem entre as empresas Eneva (E – “energia” e Neva – “nova”) e EDP, compondo assim a primeira planta. Já a terceira unidade geradora constituinte da segunda planta é organizada 100% pela Eneva, conforme pode ser visualizado na Figura 4.

Figura 4 – Organização das Termelétricas Energia Pecém e Pecém II.



Fonte: Fornecida pelo Eng. Márcio Aguiar, engenheiro químico e gerente de sustentabilidade da Eneva.

A Eneva é uma companhia brasileira, posicionada entre as maiores geradoras privadas de energia do país, que atua nas áreas de geração e comercialização de energia

elétrica, possuindo negócios complementares em exploração e produção de gás natural. Possui um portfólio de ativos operacionais localizados nos Estados do Ceará, Maranhão e Amapá.

Assim como a Eneva, a EDP também gera e comercializa energia elétrica, além de distribuí-la. Com sede na cidade de São Paulo, a EDP possui ativos em onze Estados: São Paulo, Espírito Santo, Tocantins, Mato Grosso do Sul, Santa Catarina, Rio Grande do Sul, Rio Grande do Norte, Pará, Amapá e Ceará. A EDP Energias do Brasil é controlada pela EDP Energias de Portugal, uma das maiores operadoras europeias no setor energético.

Como mencionado anteriormente, a Energia Pecém possui capacidade máxima bruta de potência instalada de 720 MW gerando energia da ordem de 6.307,2 GWh (considerando energia produzida durante 1 ano, ou seja, 8760 horas), mas o fornecimento líquido (retirando-se o consumo interno e as perdas de transmissão até o “centro de gravidade”) é de 631 MW ou 5.527,56 GWh.

Levando em consideração o consumo *per capita* de energia da população do Ceará em 2013, segundo o Balanço Energético Nacional de 2014 (BEN 2014) e do IBGE foi de 1.227 kWh/hab, conforme pode ser visualizado na Tabela 2. Observa-se que a energia gerada pela termelétrica é suficiente para abastecer uma cidade com mais de 4,5 milhões de habitantes ou até mesmo mais da metade da população do Ceará que atualmente possui cerca de 8,8 milhões de habitantes, segundo dados do IBGE do ano de 2014.

Tabela 2 - População e consumo per capita entre os anos de 2009 a 2013.

	2009	2010	2011	2012	2013	2009	2010	2011	2012	2013
	População (milhões)					Consumo per capita (kWh/hab)				
Brasil ⁽¹⁾	194.521	196.447	198.319	200.138	201.901	2.190	2.366	2.425	2.490	2.557
Brasil ⁽²⁾						1.976	2.116	2.184	2.239	2.295
Nordeste	54.271	54.731	55.170	55.590	55.990	1.202	1.301	1.303	1.360	1.427
Maranhão	6.568	6.637	6.703	6.764	6.823	1.643	1.750	1.798	1.730	1.612
Piauí	3.134	3.150	3.165	3.177	3.189	607	706	756	861	974
Ceará	8.531	8.606	8.678	8.746	8.811	928	1.031	1.040	1.146	1.227
Rio Grande do Norte	3.245	3.283	3.320	3.356	3.391	1.272	1.378	1.379	1.451	1.538
Paraíba	3.802	3.836	3.868	3.899	3.929	977	1.090	1.100	1.172	1.250
Pernambuco	8.946	9.024	9.100	9.173	9.243	1.128	1.212	1.241	1.290	1.399
Alagoas	3.219	3.244	3.268	3.290	3.311	1.175	1.235	1.188	1.352	1.446
Sergipe	2.107	2.133	2.159	2.183	2.208	1.456	1.545	1.609	1.659	1.732
Bahia	14.717	14.817	14.911	15.001	15.085	1.349	1.454	1.406	1.454	1.546

Fonte: BEN 2014 e IBGE ⁽³⁾

Notas:

¹ Consumo Brasil inclui autoprodução total;² Consumo Brasil e dados de UF inclui autoprodução circulante na rede; Fonte: EPE (Sistema SIMPLES)³ População: Estimativa elaborada pela EPE baseada na 'Projeção da População do Brasil por sexo e idade: 2000-2060 - agosto de 2013 (IBGE);

2.2.3 A Termelétrica Energia Pecém

Para gerar toda a energia, que pode abastecer metade do estado do Ceará, a termelétrica Energia Pecém utiliza o carvão mineral como combustível, importado substancialmente da Colômbia, podendo vir a ser importado dos Estados Unidos, Rússia, China e Japão, eventualmente, quando da impossibilidade de abastecimento pela Colômbia.

O carvão mineral utilizado chega através do Porto de Pecém, de onde é descarregado por guindastes especiais e transferido para uma esteira fechada (Figura 5). Essa esteira conecta o Porto do Pecém ao pátio de armazenagem de carvão da Termelétrica, possuindo 12,7 Km de extensão, sendo fechada para que o carvão fique protegido das intempéries ao longo de todo percurso, evitando que contamine o meio ambiente pela ação de ventos e chuvas. Ao longo do caminho do porto ao pátio de armazenagem há sete torres de mudança de orientação das esteiras para que possam ser vencidas as sinuosidades do trajeto (informação verbal)³.

Figura 5 - Esteira transportadora de carvão instalada do Porto do Pecém até a Termelétrica Energia Pecém.



Fonte: energiapecem.com.br (outubro/2014).

Cada navio descarrega no porto uma quantidade de carvão de 75 mil toneladas, necessitando-se de 4 a 5 dias para a conclusão do ciclo entre o descarregamento, transporte e empilhamento no pátio da termelétrica para posterior armazenagem (informações verbais)⁴.

^{3,4} Informações sobre o funcionamento da termelétrica fornecidas pelo Márcio M. de Aguiar, engenheiro químico e gerente de sustentabilidade da Eneva.

Já no pátio, como citado anteriormente, o carvão é empilhado em grandes carreiras para armazenagem e vários cuidados especiais são tomados, impedindo que o carvão contamine o lençol freático da região. O piso é preparado ao longo da extensão do pátio para captar as águas das chuvas e evitar que ela infiltre o solo e graças ao processo de umectação (processo de tornar úmido) das pilhas de carvão, as partículas não são carregadas pelo vento. Além disso, para minimizar a ação dos ventos, um cinturão de vegetação densa e alta circunda todo o pátio.

Antes de ser queimado, o carvão mineral armazenado no pátio é levado por novas esteiras (ver fotos da Figura 6), que o transportam até os silos, onde é pulverizado e preparado para a queima. Nos processos atuais de combustão pulverizada, o carvão é queimado como partículas pulverizadas, aumentando substancialmente a eficiência da combustão e a conversão de energia térmica em energia elétrica.

Figura 6 - Esteiras transportadoras de carvão instaladas dentro da termelétrica para levar os carvões aos silos, onde o combustível é pulverizado e preparado para posterior queima.



Fonte: Elaborada pela autora.

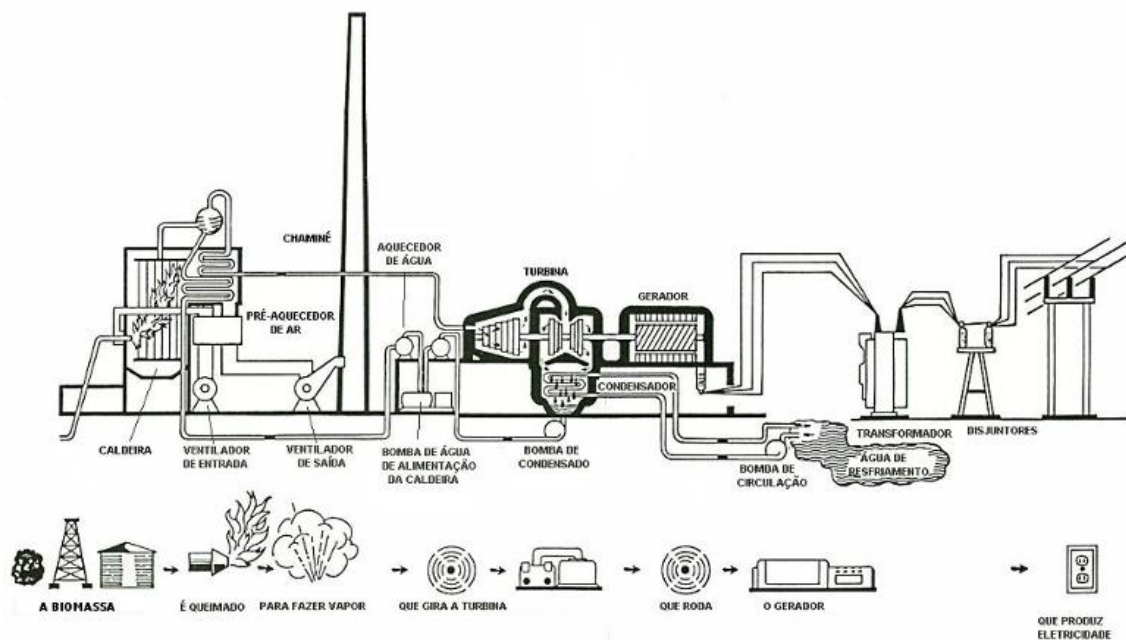
A maioria das tecnologias modernas de combustão pulverizada atinge 99% de eficiência na combustão. Já a eficiência de conversão da energia térmica em energia elétrica pode chegar a 43%, no caso de plantas com ciclo a vapor supercrítico (temperatura entre 700°C e 720°C) (aneel.gov.br). A termelétrica Energia Pecém utiliza-se da tecnologia de combustão pulverizada e seu rendimento de conversão é de 33% a 35% de eficiência.

Além do carvão mineral, outra matéria necessária para a geração de energia é a água. Na região do Complexo Industrial Porto do Pecém (CIPP), ela é encontrada em

abundância, devido à proximidade com o reservatório da COGERH, Companhia de Recursos Hídricos. Nesse processo, dutos subterrâneos são utilizados para captar a água do reservatório que passa pela estação de tratamento onde segue para a caldeira.

Na caldeira, o pó de carvão mineral é queimado e o calor gerado aquece a água resultando em um vapor superaquecido. Esse vapor faz girar uma turbina, transformando energia térmica em energia mecânica. A turbina, por sua vez, faz girar o eixo de um gerador, produzindo eletricidade. Depois de passar pela turbina, o vapor precisa ser condensado para ser bombeado de volta à caldeira, onde o processo se repete. Todo esse procedimento acontece dentro do condensador, por resfriamento de vapor. A água é utilizada no resfriamento do vapor e depois devolvida desmineralizada ao ambiente e com uma discreta elevação de temperatura, conforme ilustra a Figura 7.

Figura 7 - Esquema de produção de energia de uma termelétrica.



Fonte: engenhariacompartilhada.com.br.

Quanto aos resíduos gerados pela termelétrica, os mais densos, por causa da gravidade, ficam no fundo da caldeira onde são coletados. São as cinzas pesadas ou *bottom ash*. Atualmente, essas cinzas são coletadas e reaproveitadas para a produção de cimento por uma cimenteira situada no CIPP. Silva, Chies e Zwonok (1997) afirmam em seu artigo que a incorporação de cinzas e escórias da combustão de carvão para a fabricação de cimento Portland pozolânico começou na França por volta do ano de 1952, resultando em 1957 no

cimento contendo 20% em peso de cinza volante. No Brasil, a partir da década de 70, o cimento pozolânico passou a ser produzido.

Já a cinza leve ou *fly ash*, objeto de estudo desta pesquisa, são carregadas pela fumaça que sai da caldeira, atravessando o dessulfurizador (para diminuir a emissão de dióxido de enxofre ao ambiente). Em seguida, a fumaça percorre uma série de filtros cônicos, onde mais de 99% das cinzas são retiradas antes de ser liberada na atmosfera pela chaminé.

Dos filtros cônicos, toda porcentagem de cinza leve, é submetida à uma lavagem dos gases por uma solução de água e cal hidratada (em uma concentração de 18% a 20% de cal), também chamada de “leite de cal”, para só depois serem encaminhadas ao silo e em seguida serem coletadas pelos caminhões que transportam a cinza leve até a célula de armazenamento. Já que se trata de um material pulverulento, esse banho de “leite de cal” ajuda a controlar a poeira produzida pelo transporte da cinza.

O caminhão que transporta a cinza leve do silo até a célula tem capacidade de 9 a 10 toneladas (ver Figura 8), gastando-se um tempo em torno de 10 minutos para que sejam carregados. Atualmente, cinco caminhões trabalham fazendo esse transporte diariamente (informação verbal)⁵.

Figura 8 - Transporte da cinza até a célula sendo realizada por caminhões.



Fonte: Elaborada pela autora.

Quanto às células de armazenamento, a termelétrica possui duas. A primeira célula foi verticalizada, aumentando-se assim sua capacidade em 60% do volume inicial que era de 220 mil m³. Após a verticalização, a capacidade da célula aumentou para mais de 350 mil m³ de volume, conforme pode ser visualizado na Figura 9. Mesmo com essa

⁵ Informações sobre a logística dos caminhões da termelétrica fornecidas pelo Márcio M. de Aguiar, engenheiro químico e gerente de sustentabilidade da Eneva.

verticalização, já se utiliza a área da segunda célula, pois a capacidade da primeira foi superada.

Figura 9 - Verticalização da 1ª célula de armazenamento de cinzas da termelétrica e 2ª célula ainda não utilizada.



Fonte: Elaborada pela autora.

Em suas construções, as células foram impermeabilizadas com mantas duplas devido à possível periculosidade do resíduo. As células foram construídas para armazenagem de um resíduo do tipo I – Perigoso, já que na época da construção não se dispunha da classificação correta do resíduo, que após análise laboratorial constatou-se ser um resíduo de classificação do tipo II A – Não inerte. Assim, se for necessário ser construída a terceira célula, esta terá uma manta simples em sua impermeabilização.

De acordo com a NBR 10.004 da ABNT, os resíduos sólidos podem ser classificados, quanto aos riscos potenciais de contaminação do meio ambiente em: (i) classe I ou Perigosos e (ii) classe II ou Não perigosos, sendo esta última classificação dividida em dois sub-grupos, Não inertes (II A) e Inertes (II B).

Segundo a NBR 10.004 da ABNT, resíduos do tipo II A são aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos de classe I – Perigosos ou de resíduos classe II B – Inertes, nos termos da Norma. Os resíduos classe II A – Não inertes podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água, necessitando também de uma destinação final adequada para serem descartados no meio ambiente.

Como citado anteriormente, a Energia Pecém + UTE Pecém II possui 3 unidades geradoras de energia, produzindo diariamente um volume de 1200 a 1350 toneladas de cinzas

(leves e pesadas). Essa quantidade de cinzas corresponde a 10% da quantidade de carvão consumida diariamente, ou seja para se gerar 300 toneladas/dia de cinza leve foram necessárias 3000 toneladas/dia de carvão.

Por fim, para finalizar o ciclo de geração de energia, a eletricidade gerada na turbina passa pelos transformadores para que a voltagem seja ajustada aos padrões das linhas de transmissão. Antes de chegar ao consumidor, a eletricidade atravessa, ainda, uma subestação dentro da usina termelétrica e somente depois é distribuída.

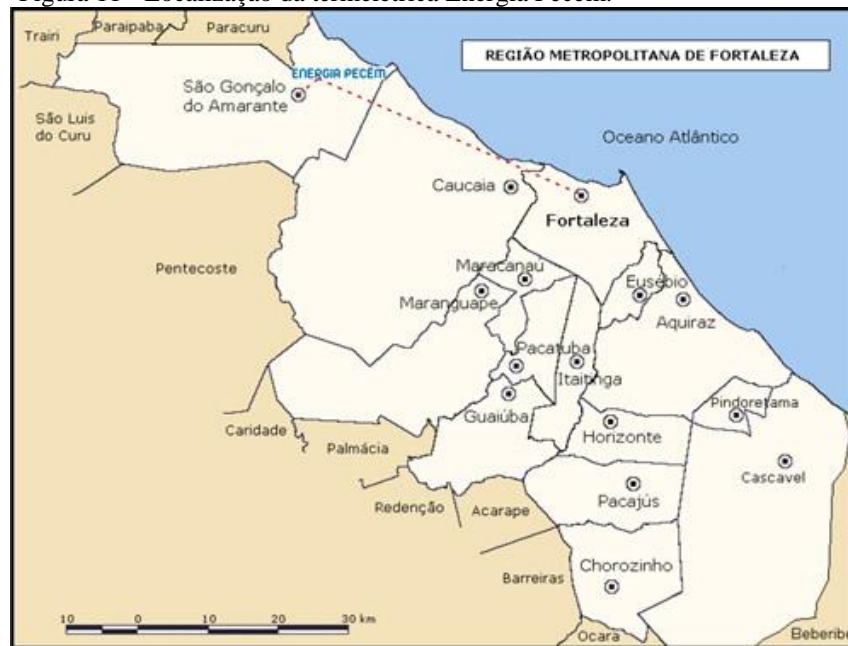
Na Figura 10 são apresentadas algumas imagens da termelétrica Energia Pecém e na Figura 11 é indicada a localização da termelétrica em relação à capital cearense, Fortaleza.

Figura 10 - Termelétrica Energia Pecém.



Fonte: energiapecem.com.br, 2014.

Figura 11 - Localização da termelétrica Energia Pecém.



Fonte: energiapecem.com.br, 2014.

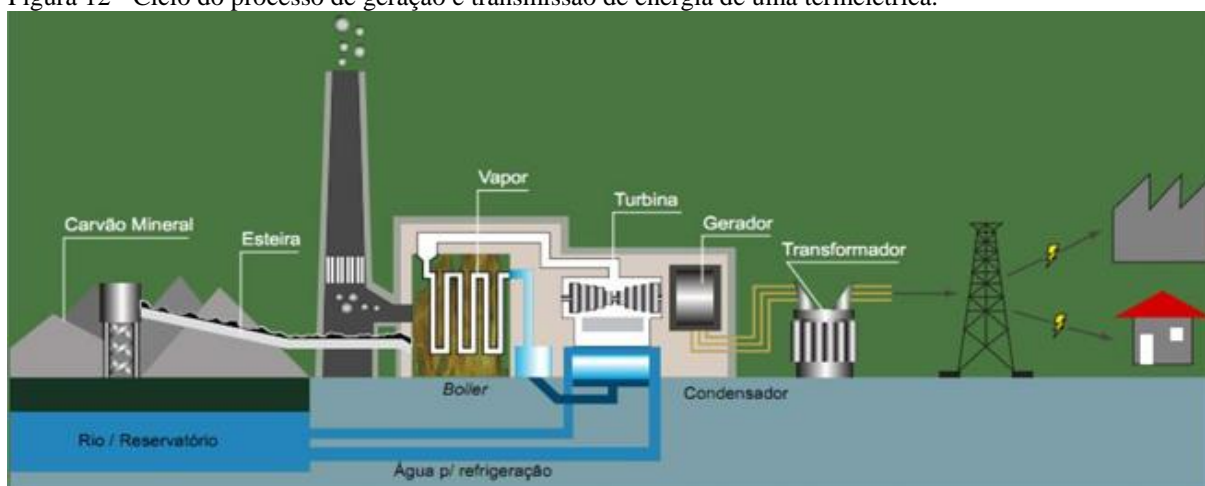
2.3 O Processo Produtivo de uma Termelétrica

Uma usina termelétrica pode ser definida como um conjunto de equipamentos cuja finalidade é a geração de energia elétrica. O processo de transformação de calor em energia elétrica mais comum e mais utilizado no Brasil é o que emprega o carvão como combustível. Antes de ser aproveitado na usina, o carvão é extraído da terra através das minas de carvão. Após ser transportado da mina, normalmente por via férrea, ele chega à usina através de esteiras rolantes, sendo armazenado em silos (aneel.gov.br, 2014).

Em seguida, é moído nos moinhos até ficar com uma granulometria bem fina, semelhante ao cimento. Esse material é soprado por grandes ventiladores para os queimadores da caldeira. Dentro da caldeira, na região conhecida como fornalha ou câmara de combustão, esse carvão moído é queimado, tornando a energia química contida nele em energia térmica (calor). O calor irá aquecer a água tratada que percorre o interior da caldeira através de tubos, transformando-a em vapor.

Esse vapor, à alta pressão e temperatura, faz girar as turbinas que, por sua vez, movimentam os geradores de energia que produzem a eletricidade. A energia elétrica é transportada por linhas de alta tensão aos centros de consumo e o vapor é resfriado em um condensador e convertido outra vez em água, voltando aos tubos e iniciando um novo ciclo, como pode ser verificado na Figura 12.

Figura 12 - Ciclo do processo de geração e transmissão de energia de uma termelétrica.



Fonte: andreribeiroeageografia.blogspot.com.br, 2014.

De forma resumida, o processo de geração e transmissão de energia de uma termelétrica consiste em três etapas. Nas usinas térmicas convencionais, a primeira etapa consiste na queima de um combustível, como o carvão, óleo ou gás, transformando a água em vapor com o calor gerado na caldeira. A segunda etapa consiste na utilização deste vapor, em alta pressão, para girar a turbina que por sua vez aciona o gerador elétrico e na terceira etapa, o vapor é condensado, transferindo o resíduo de sua energia térmica para um circuito independente de refrigeração, retornando a água à caldeira, completando o ciclo (furnas.com.br, 2014).

Se por um lado, o carvão gera energia, fator preponderante para o desenvolvimento de uma região, do outro lado, seu resíduo pode trazer ao meio ambiente grande quantidade de substâncias potencialmente tóxicas, como hidrocarbonetos aromáticos polinucleares e várias espécies químicas inorgânicas, algumas de características carcinogênicas e mutogênicas (QUIMLAB, 2015). Fica evidente o problema ambiental quanto à destinação final do resíduo de carvão, as cinzas, podendo estas serem do tipo leve ou volante (*fly ash*) ou pesada (*bottom ash*).

Parte dessas cinzas, do tipo volante, é utilizada na fabricação de cimento pozolânico, mas grande porcentagem, ainda é estocada no solo (com as devidas precauções) sem possuir uma destinação final que possa consumir a grande quantidade do volume que é gerado pelas indústrias. Observa-se que em outros países a utilização é mais abrangente, constituindo excelente material de construção para a fabricação de artefatos cerâmicos, sinterizados e de concreto, podendo ser utilizado como fíler em misturas betuminosas e fíler nas indústrias do plástico, na construção de aterros estruturais, dentre outras finalidades (SILVA *et al.*, 1997).

Para minimizar os efeitos contaminantes da combustão sobre as redondezas, a central geralmente dispõe de uma chaminé de elevada altura e de alguns precipitadores que retêm as cinzas e outros resíduos voláteis da combustão. As chaminés da termelétrica Energia Pecém possuem altura de 110 m (portalpecem.com.br, 2014).

Alguns tipos de usinas com diferentes combustíveis são: usina a carvão, usina a óleo, usina nuclear, usina a gás natural (onde os rendimentos obtidos para transformação em energia elétrica são superiores, da ordem de 55%, que é muito, se comparado ao rendimento do carvão, que é da ordem de 33% a 35%), sendo todos esses combustíveis não renováveis (furnas.com.br, 2014).

Como mencionado, o carvão mineral, assim como os derivados de petróleo e o gás natural, é um combustível fóssil não renovável, pois leva milhões de anos para se formar. Além das termelétricas, esses combustíveis podem ser utilizados como matéria-prima para gerar calor, eletricidade e força motriz em diversas outras indústrias, como siderúrgicas, químicas, petroquímicas, dentre outras.

2.3.1 Informações Sobre o Carvão como Fonte de Energia

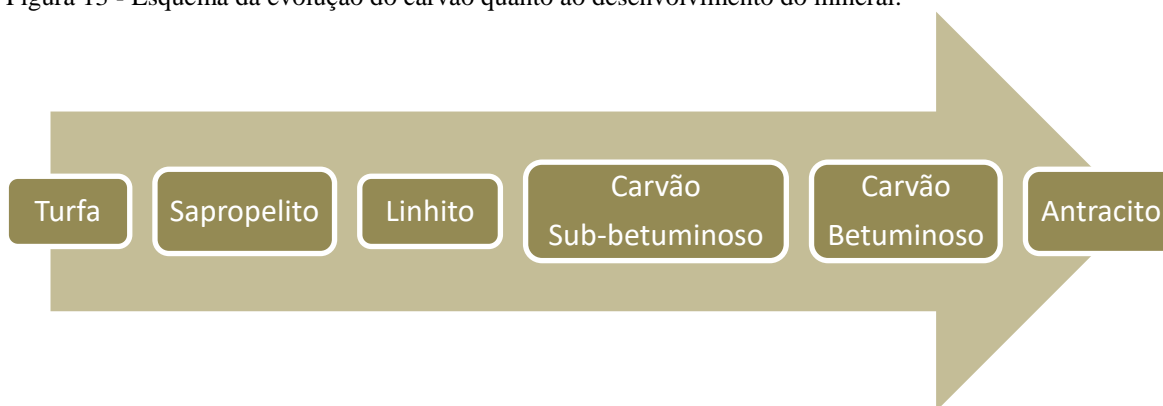
Existem dois tipos básicos de carvão na natureza: vegetal e mineral. O vegetal é obtido a partir da carbonização da lenha. O carvão mineral é um combustível fóssil extraído da terra através do processo de mineração e acredita-se ser o combustível natural mais abundante do planeta. Tanto o carvão vegetal quanto o mineral podem ser usados na indústria (principalmente siderúrgica) e na produção de energia elétrica. No entanto, enquanto o primeiro é pouco utilizado, exceto no Brasil, maior produtor mundial, o segundo é bastante consumido em outros países do mundo.

O carvão mineral é encontrado em grandes profundidades ou perto da superfície e possui aparência preta ou marrom, lisa, macia e quebradiça. É proveniente de depósitos de restos de plantas e árvores, ou seja, uma vegetação pré-histórica que se acumulou em pântanos sob uma lâmina d'água há milhões de anos. Com o passar do tempo, estes depósitos foram cobertos por argilas e areias, ocorrendo um soterramento gradual que provocou aumento de temperatura e pressão sobre a matéria orgânica depositada (furnas.com.br, 2014).

Esse processo expulsou o oxigênio e o hidrogênio, concentrando o carbono (processo de carbonificação). Existem cinco estágios na formação do carvão mineral: turfa, sapropelito, linhito, carvão (hulha) e antracito, os quais dependem de fatores como pressão e temperatura para sua formação (ABCM, 2014).

A qualidade do carvão é definida, dentre outros métodos, pelos estágios de desenvolvimento do mineral, citados acima, que evolui da seguinte forma: turfa à sapropelito à linhito à carvão sub-betuminoso à carvão betuminoso à antracito que é o último estágio e, portanto o de melhor qualidade, como indica a Figura 13.

Figura 13 - Esquema da evolução do carvão quanto ao desenvolvimento do mineral.



Fonte: Elaborada pela autora.

A turfa, como se pode observar, constitui um dos primeiros estágios do carvão e possui baixo conteúdo carbonífero, com teor de carbono na ordem de 45%; o linhito apresenta um índice que varia de 60% a 75%; o carvão betuminoso (hulha), mais utilizado como combustível, contém de 75% a 85% de carbono; e o mais puro dos carvões, o antracito, apresenta um conteúdo carbonífero superior a 90% (ABCM, 2014).

Segundo a Associação Brasileira de Carvão Mineral (ABCM), a história do carvão no Brasil se iniciou há cerca de 210 milhões de anos, na época em que a crosta da terra ainda sofria por terremotos, vulcões, furacões, vendavais e maremotos. Esses fenômenos provocaram lentos ou violentos cisalhamentos, de onde surgiram as montanhas e os limites costeiros brasileiros que se separaram da África pelo Oceano Atlântico.

Ainda segundo a ABCM, todo tipo de vegetação crescia, naquelas épocas geológicas, formando grandes e densas florestas, favorecidas pela atmosfera muito rica em CO₂, permitindo o crescimento dos vegetais em um clima particularmente quente e úmido. O carvão é então a parte celulósica da vegetação, transformada pelo tempo, pressão, bactérias e outros agentes anaeróbicos, em uma massa carbonosa.

Sucessivas formações de florestas podem ter ocorrido ao longo de milhares de anos em uma mesma região, e então, camadas e camadas de carvões diferentes serão encontradas. Como já mencionado anteriormente, a ocorrência do carvão no Brasil encontra-

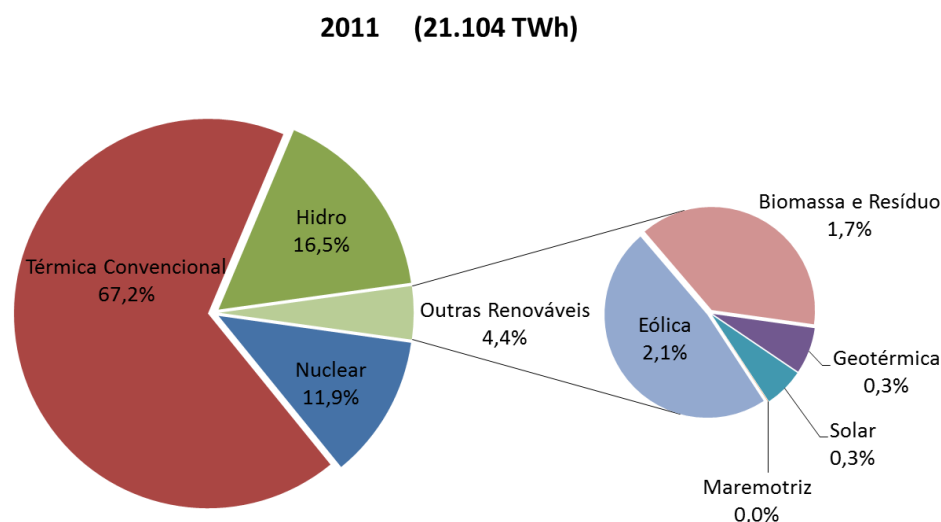
se principalmente nos estados do Rio Grande do Sul (28 bilhões de toneladas), Santa Catarina (3,3 bilhões de toneladas) e Paraná (104 milhões de toneladas) (ABCM, 2014).

O carvão da região Sul/Sudeste do Brasil é, em sua maioria, do tipo betuminoso, com ocorrência em São Paulo e no restante do país predominam as reservas de carvão do tipo linhito à sub-betuminoso, sendo a região Sul/Sudeste responsável por 90% da produção do país (InfoEscola, 2014).

O carvão que gera a cinza estudada nesta pesquisa é do tipo sub-betuminoso, proveniente em sua maioria da Colômbia, país que ocupa o décimo lugar na produção global de carvão, ficando atrás dos Estados Unidos, Rússia, China, Austrália, Índia, Alemanha, Ucrânia, Cazaquistão e África do Sul, segundo o *BP Statistical Review of World Energy* (2014).

De acordo com dados da *International Energy Agency* (IEA), o carvão é a fonte mais utilizada para geração de energia elétrica no mundo, respondendo por 67,2% da produção total, conforme mostra a Figura 14. A IEA também projeta que o minério manterá posição semelhante nos próximos 30 anos.

Figura 14 - Geração de Energia Elétrica Mundial por fonte em 2011.



Fonte: EIA US Energy Information Administration, 2014.

A principal restrição à utilização do carvão é o forte impacto socioambiental provocado em todas as etapas do processo de produção e também no consumo. A extração, por exemplo, provoca a degradação das áreas de mineração. A combustão é responsável por emissões de gás carbônico (CO₂). Projetos de mitigação e investimentos em tecnologia (*clean coal technologies*) estão sendo desenvolvidos para atenuar este quadro.

2.3.2 Principais Resíduos Gerados nas Termelétricas

A utilização de carvão como combustível em centrais termelétricas produz resíduos sólidos, denominados “cinzas”, que contêm pequenas quantidades de partículas carbônicas incombustíveis. Em média 1 kg de carvão produz cerca de 150 g de cinzas, que por sua vez contêm entre 6 e 24 g de carvão incombustível. Cerca de 20% dos resíduos precipitam-se no fundo da câmara de combustão (*bottom ash*), enquanto que os 80% restantes são compostos de partículas finíssimas (*fly-ash*) que são recolhidas por meio de filtros especiais instalados ao longo do percurso de saída dos gases de combustão (DAWSON e BULLEN, 1991).

A cinza pesada é um material granular, poroso, com distribuição granulométrica predominantemente de areia. Essa cinza resulta da queima do carvão mineral pulverizado no interior das caldeiras de combustão das usinas termelétricas. Ela é gerada a partir da aglomeração dos grãos semifundidos que se depositam no fundo das caldeiras e são transportados por arraste hidráulico até as bacias de sedimentação (LEANDRO e FABBRI, 2009).

A composição da cinza pesada constitui-se principalmente por sílica, alumina e óxido de ferro, com porcentagens menores de cálcio, magnésio, sulfatos e outras combinações. A composição química desse tipo de material depende principalmente da fonte de carvão mineral. Cinzas derivadas de linhitas ou carvões sub-betuminosos têm uma porcentagem maior de cálcio do que as cinzas derivadas de antracito ou carvão betuminoso (FHWA, 2014). A cinza proveniente da Energia Pecém, termelétrica do presente estudo, é derivada do carvão do tipo sub-betuminoso, portanto, possui porcentagem significativa de cálcio em sua composição.

Segundo a norma americana ASTM C 618-05 que diz que cinzas provenientes de carvões do tipo linhito à sub-betuminoso são classificadas como Classe C e possuem em sua composição um certo teor de cal, diferente das cinzas provenientes de carvões do tipo betuminoso à antracito, classificadas em Classe F, que não possuem parcela de cal em sua composição. Além disso, a norma ainda diz que as cinzas de Classe C possuem propriedades pozolânicas e cimentícias e as cinzas de Classe F possuem apenas as propriedades pozolânicas.

Uma central termelétrica de dimensão média produz centenas de toneladas de cinzas por dia. As suas características físicas e químicas são extremamente diferenciadas em função, sobretudo, do tipo de carvão e fornos utilizados. A composição granulométrica das

cinzas volantes se situam, geralmente, entre 5 e 200 μm , com um tamanho médio de 30 a 50 μm . Assim, a utilização das cinzas volantes não necessita, em geral, de ser submetida à trituração antes de ser empregada.

Além disso, as partículas tendem a apresentar uma forma esférica, o que confere uma boa plasticidade à massa. Tratam-se de materiais, na sua grande parte, amorfos (sílica de vidro), contendo percentagens muito baixas de componentes cristalinos, constituídos por agulhas finíssimas de mulita. A própria composição química parece ser muito variável: sílica (30 – 55%), alumina (15 – 40%), ferro (5 – 14%), cálcio (1–15%), sódio (0,1 –1,5%), potássio (0,2 – 3,6%), magnésio (1 – 5%). Encontram-se também vestígios de outros elementos, como o titânio e o enxofre (FHWA, 2014).

Devido à falta de processos que viabilizem a utilização desses resíduos, na maioria das vezes eles se tornam um problema para as indústrias, por seu volume de geração e pelas conseqüentes dificuldades em seu condicionamento, armazenagem, transporte e destinação final. Vários trabalhos estão sendo desenvolvidos com intuito de dar uma destinação ambientalmente adequada aos resíduos gerados nas atividades relacionadas às termelétricas. Nesse sentido, a pavimentação, através, por exemplo, dos pavimentos flexíveis, pode ser uma área promissora para o emprego das cinzas advindas das termelétricas.

Segundo Silva, Chies e Zwonok (1997), no Brasil a geração de cinzas iniciou-se na década de 40, ocorrendo o maior uso em 1960 na construção da represa de Jupia (Rio Paraná SP/MS). A partir de 1960 foi intensificado o uso em cimento, onde incorporava-se a cinza volante no clínquer para fabricação do cimento Portland pozolânico e na década de 70 a técnica consagrou-se. A partir de 1980, foram desenvolvidas várias pesquisas voltadas à busca de aplicação para as cinzas. No que se refere à pavimentação, os autores citam um trecho experimental de 1000m com base de cinza volante, areia e cal na BR-101 (Imbituba/SC).

Os pavimentos flexíveis possuem a capa de rolamento composta por uma mistura de agregados e ligante asfáltico, e pode ser formado por quatro camadas: revestimento asfáltico (capa ou camada de rolamento), base, sub-base e reforço do subleito. As três últimas camadas são comumente chamadas de camadas granulares, por serem camadas que utilizam geralmente solos ou misturas de solos na sua composição. Como citado, o uso das cinzas em camadas granulares de pavimentos seria uma excelente opção (desde que se encaixem nos parâmetros estabelecidos pelas normas da área), tendo em vista a necessidade do uso de grandes volumes de materiais.

2.4 Estabilização de um Solo para Finalidades Rodoviárias

Para que um solo possa ser empregado em camadas mais nobres da pavimentação alguns requisitos mínimos são exigidos, como por exemplo, adequada capacidade de suporte, baixa expansão e valores controlados dos índices de consistência, etc. Quando algumas dessas condições não forem satisfeitas, técnicas podem ser empregadas para a melhoria das propriedades do solo. Dentre essas, pode-se destacar a estabilização.

Baptista (1976) define estabilização de solos como um processo de natureza física, físico-química ou mecânica, tornando o solo mais estável para os limites de sua utilização. O objetivo final desse processo é fazer com que o material venha a atender às especificações de uso para seu emprego em camadas mais nobres do pavimento.

Assim, a estabilização consiste em tornar o solo, que inicialmente não atende aos critérios para sua utilização em rodovias, mais estável para a aplicação em camadas granulares de pavimentos. Em outras palavras, estabilizar um solo significa conferir-lhe a capacidade de resistir e suportar as cargas e os esforços induzidos pelo tráfego ao pavimento e também às ações erosivas de agentes naturais sob as condições mais adversas de solicitação consideradas no projeto (PINTO, 1971).

Um solo pode ser estável naturalmente, quando ele já apresenta propriedades adequadas para a área de pavimentação. A estabilidade pode ser uma característica natural do material ou pode ser atingida através de um processo de estabilização mecânica ou por meio do uso de um dado agente químico. O tipo de estabilização escolhida depende das propriedades do solo no estado natural, das propriedades desejadas e dos efeitos no solo após a estabilização.

Há alguns tipos de estabilização para solos que são divididas, geralmente, em três grandes grupos: as que empregam meios mecânicos (aumento da energia de compactação com rearranjo de partículas); as estabilizações granulométricas (misturas de solos, adição ou retirada de partículas) e as que empregam meios químicos com a utilização de aditivos, como cimento, cal, betume, dentre outros.

2.4.1 Estabilização Mecânica

A estabilização mecânica ou estabilização por compactação visa dar ao solo (ou mistura de solos) uma condição de densificação máxima relacionada a uma energia de compactação e a uma umidade ótima (SPENCE e COOK, 1983). Pode-se dizer que é um

método complementar a outros métodos de estabilização, já que consiste em um processo sempre utilizado na execução das camadas do pavimento. Para que a compactação atinja melhores resultados, solos que possuam grãos de variados tamanhos e com uma pequena quantidade de argila são preferíveis.

A estabilização mecânica consiste na variação da energia de compactação (normal, intermediária, modificada, ou outra que seja especificada pelos órgãos locais) e é a forma de estabilização mais utilizada, sendo responsável pela melhoria da estabilidade mecânica de praticamente todo tipo de solo. Entretanto, sabe-se que a operação da compactação nem sempre é suficiente para estabilizar um dado material, principalmente quando os solos a serem tratados são coesivos (argilosos), ou seja, apresentam uma granulometria muito fina (LITTLE,1995).

Devido à sua estrutura, os solos mais finos apresentam resistência à penetração de água, absorvendo-a muito lentamente. Entretanto, uma vez que tenha conseguido penetrar no solo, a água também encontra dificuldade para ser extraída do interior do mesmo, por isso a estabilização mecânica neste tipo de solo, às vezes, se torna insuficiente, diferente do que ocorre em solos não-coesivos (arenosos).

Há que se considerar, também, que alguns solos finos tropicais que sofreram o processo de laterização apresentam uma estabilidade natural em função do tipo de argilo-mineral presente na fração fina do material. É o caso dos Solos Finos Lateríticos presentes em alguns estados do Brasil. Esses solos representam exceção à teoria tradicional que não considera o uso de solos com excesso de finos para aplicação na área de pavimentação.

2.4.2 Estabilização Granulométrica

Conforme Villibor (1982), a estabilização granulométrica consiste na combinação de solos ou misturas de solos, em uma proporção previamente dimensionada para que se enquadrem dentro de uma determinada especificação, proporcionando um produto de estabilidade maior do que a dos solos de origem para a aplicação em um caso particular. Alguns fatores, como a natureza das partículas dos solos, influenciam diretamente nessas composições granulométricas dos materiais, podendo proporcionar uma menor permeabilidade e uma maior densidade (GONDIM, 2008).

Lopes (2011) trabalhou com estabilização granulométrica quando compôs misturas de dois tipos de cinzas (volante e pesada) de carvão mineral com solo areno-siltoso não laterítico, característico do estado do Rio de Janeiro. A autora obteve resultados

satisfatórios com as misturas solo+cinza, pois apresentaram um comportamento mecânico compatível com as exigências de um pavimento de baixo volume de tráfego.

Como exemplo da estabilização mecânica e granulométrica conjunta, pode-se citar o trabalho de Cavalcante e Barroso (2009). Esses autores analisaram o efeito da estabilização granulométrica, por meio da adição de areia de rio, bem como o efeito da mudança da energia de compactação em um solo típico da região do Agropólo Baixo Jaguaribe/CE. A ideia da proposição de mistura ocorreu devido ao solo local ser caracterizado pela ausência da fração de areia, justificando assim a estabilização granulométrica.

2.4.3 Estabilização Química

A estabilização química refere-se às alterações produzidas na estrutura de um solo pela introdução de certa quantidade de aditivo cimentante, suficiente para melhorar as propriedades físicas e mecânicas do material, possibilitando o seu emprego para fins de projeto de rodovias, por exemplo.

Cimento, asfaltos ou betumes, produtos químicos industrializados como cloretos, ácidos fosfóricos, etc. são outros exemplos de aditivos utilizados para estabilizar quimicamente o solo (CORDEIRO, 2007).

Quanto à adição de um agente químico ao solo existe uma terminologia a ser considerada entre solo estabilizado e solo melhorado. Solo estabilizado ocorre quando se tem um ganho significativo de resistência com o emprego do aditivo e solo melhorado ocorre quando a adição busca melhoria de outras propriedades, como por exemplo redução da plasticidade, sem um ganho significativo de resistência (CORDEIRO, 2007).

2.5 Estabilização Química com o uso da Cal

2.5.1 A Cal como Agente Estabilizante

Uma das técnicas mais antigas utilizadas pelo homem para obtenção da estabilização ou melhoria de solos instáveis é a da adição de cal (GUIMARÃES, 2002). Essa técnica de estabilização envolvendo a cal é chamada de solo-cal e a estabilização consiste, como o próprio nome já diz, em uma mistura de solo, cal e água, com uma proporção estudada previamente.

De acordo com Santos (2004), o uso da cal é recomendado para melhoria de solos argilosos ou muito siltosos, que apresentem em geral plasticidade e expansão elevadas, além de baixa capacidade de suporte. Após a reação, a adição do agente melhora a trabalhabilidade do solo reduzindo a expansão e aumentando a resistência.

O autor ainda cita que solos do grupo A-5, A-6, A-7 e alguns A-2-6 e A-2-7, do sistema de classificação da *American Association of State Highways and Transportation Officials* (AASHTO), são suscetíveis à cal e solos classificados como CH, CL, MH, ML, CL-ML, SC, GC e GM⁵ pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) devem ser considerados como potencialmente estabilizáveis com cal (SANTOS, 2004).

O Óxido de Cálcio (CaO), mais conhecido comercialmente como cal, é um dos materiais de construção mais antigos do mundo. É obtido pela decomposição térmica (calcinação ou queima) de rochas calcárias moídas em diversos tipos de fornos, a uma temperatura média de 900°C. Sua utilização é muito abrangente nos mais diversos segmentos: construção civil, construção de estradas, siderurgia e metalurgia, indústria química, papel e celulose, indústria alimentícia, agricultura, saúde e preservação ambiental (TENG JÚNIOR, 2001).

A chamada cal virgem, também denominada cal viva ou cal ordinária, é o produto inicial resultante da queima de rochas calcárias, composto predominantemente dos óxidos de cálcio e magnésio. A aplicação dessa cal exige muitos cuidados com a segurança dos trabalhadores e, dessa forma, em alguns países, como o Brasil e os Estados Unidos, o seu uso vem sendo substituído gradativamente pela cal hidratada que oferece maior segurança aos seus operadores. Sendo esta, como o próprio nome sugere, uma combinação da cal virgem com água, ou seja, $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2$.

A cal hidratada é resultante da hidratação dos óxidos de cálcio e/ou cálcio-magnésio e é obtida na forma de pó seco, com 17% a 19% de água combinada (GUIMARÃES, 2002). Essa cal é classificada, de acordo com a norma NBR 7175 (2003) da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), em função de sua composição química, como: CH I, CH II e CH III. Azevedo *et al.* (1998) comentam que a diferença principal entre esses tipos de cales encontra-se nos teores de cálcio (maiores, tanto mais próxima a cal do CH I) e nos teores de carbonatos (menores, tanto mais próxima a cal do CH I).

A estabilização da mistura solo-cal é realizada com hidróxido de cálcio ou óxido de cálcio. A estabilização depende do ataque químico pela cal aos argilominerais do solo para

⁵ Conforme o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), G: pedregulho, S: areia, M: silte, C: argila, O: solo orgânico, W: bem graduado, P: mal graduado, H: alta compressibilidade e L: baixa compressibilidade.

formar compostos cimentícios. Quando se adiciona cal a um solo argiloso em presença de água, diversos tipos de reações químicas ocorrem. Algumas dessas reações acontecem rapidamente, enquanto outras são graduais, sendo afetadas pelo tempo e pela temperatura (CORDEIRO, 2007).

Azevedo *et al.* (1998) definiram a mistura de solo-cal como sendo uma mistura íntima de solo, cal e água em proporções determinadas através de ensaios laboratoriais. Segundo os autores a aplicação dessa técnica é fundamentada em reações químicas e físico-químicas que ocorrem entre a cal e os constituintes do solo, principalmente com a fração argila.

O tratamento de solos utilizando a cal como aditivo pode ser classificado como: solo modificado pela cal e solo estabilizado pela cal (LITTLE, 1999). Embora pareça o mesmo método, os dois tipos possuem processos distintos. O primeiro precisa de um baixo teor de agente cimentante, ou seja, apenas o suficiente para desenvolver as reações imediatas ou de fase rápida, sem desenvolver as reações lentas (cimentantes) ou pozolânicas. Já em relação ao segundo processo de estabilização, Dias (2004) relata que o teor da cal adicionado é tal, que propicia a ocorrência das reações da fase rápida e da fase lenta.

Mais precisamente, o tratamento de solo modificado pela cal consiste em modificar o solo com um ganho de resistência imediata devido à troca de cátions de cálcio fornecidos pela cal ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ ou cal hidratada) por cátions presentes no solo. Já o segundo, solo estabilizado pela cal, tem um ganho significativo de resistência, obtida ao longo prazo, atribuído às reações pozolânicas (LITTLE, 1999).

Little (1999) afirma que as reações pozolânicas consistem na formação de silicatos de cálcio hidratados e aluminatos de cálcio hidratados que são produzidos a partir das reações entre o cálcio da cal e os aluminatos e silicatos solubilizados na superfície do argilo-mineral. A reação pozolânica pode se estender por muitos anos desde que esteja presente na mistura uma quantidade suficiente da cal para sua ocorrência e que o pH remanescente permaneça elevado.

Little (1999) ainda comenta que o sucesso da reação pozolânica está diretamente relacionado com a reatividade do solo tratado, podendo apresentar resultados mais eficazes à amostra estabilizada, melhorando substancialmente a capacidade de suporte desta. Esses resultados podem ser: o aumento dos valores do módulo de resiliência, melhorias na resistência ao cisalhamento, ganhos contínuos de resistência e durabilidade, mesmo sobre os efeitos da variação climática ou danos por carregamento (LITTLE, 1995).

Guimarães (2002) comenta que a reação pozolânica está fundamentada no caráter pozolânico dos materiais estabilizados. O autor relata uma definição sobre um material de característica pozolânica, afirmando que este quando em combinação com a cal e em presença de água, sob condições de temperatura ambiente, produz compostos hidratados estáveis com propriedades ligantes.

Carvalho (1988) comenta que os fatores mais importantes para o sucesso da reação pozolânica são as fontes de sílica, alumina e ferro. O autor destaca os argilo-minerais como a fonte principal de sílica e alumina e menciona que em solos lateríticos, os componentes livres de sílica, alumina e ferro participam ativamente do processo de estabilização.

Para Mallela *et al.* (2004), o solo possui diversas propriedades e características que influenciam a sua reatividade com a cal. Dentre elas, podem ser citadas: o pH do solo, a mineralogia da fração argila, a presença de carbonatos e/ou sulfatos, a relação sílica/alumínio, a relação sílica/sesquióxidos, o grau de intemperismo, o teor de matéria orgânica, a drenagem natural, a presença excessiva de sódio permutável e o ferro extraível.

2.5.2 Alguns Estudos sobre o Emprego da Cal na Área de Pavimentação

A cal pode agir em misturas de solos como um encapsulante do resíduo que o mesmo venha a conter. De forma simples, a estabilização química envolvendo agentes encapsulantes em resíduos contaminados consiste em diminuir a superfície de contato do contaminante, existente no resíduo, com o meio em que está inserido. Dessa forma, o resíduo torna-se menos agressivo ao meio ambiente, podendo assim, ser reincorporado, por exemplo, em camadas dos pavimentos.

Muitas são as pesquisas envolvendo a técnica de estabilização. Rabassa *et al.* (2006) investigaram o ganho de resistência à compressão de um solo arenoso fino laterítico utilizando como agentes estabilizantes a cal e/ou cimento. Os autores dosaram as misturas e encontraram um teor ótimo de 5% para a cal, em seguida, acrescentaram 1% de cimento resultando em pequeno ganho de resistência, a curto prazo, e finalmente moldaram misturas apenas com o cimento, também no teor de 5%.

Para o desenvolvimento do programa experimental, Rabassa *et al.* (2006) realizaram ensaios de resistência à compressão simples (RCS), em misturas solo+cal nos teores 3%, 5%, 7%, 9% e 11% moldadas na energia Proctor Normal e os corpos-de-prova foram rompidos aos 3, 7, 14 e 28 dias, com e sem imersão prévia em água por 4 horas. Após

avaliação dos resultados, os autores perceberam que a estabilização do solo arenoso fino estudado com cal é viável, atingindo valores significativos de RCS com o tempo de cura. Somente a adição integral de cimento trouxe ganho relevante de resistência a curto prazo.

No estado do Ceará, a primeira experiência utilizando mistura de solo-cal em camada de base e sub-base foi executada pelo Departamento de Edificações, Rodovias e Transporte do Estado (DERT-CE), no ano 2000 (LOIOLA e NOBRE JÚNIOR, 2001). Foi projetado um trecho com extensão de 1 Km que fazia parte do segmento de 8,72 Km para ligar o município de Limoeiro do Norte ao distrito de Flores, situado no município de Russas. O trecho foi executado a partir do uso de uma técnica de mistura no local com o espalhamento manual de sacos da cal.

Posteriormente, Loiola e Barroso (2007) discutiram em seu trabalho o caso de uma rodovia cearense (conhecida localmente por rodovia do Melão – CE 377) que, até os dias atuais, mantém em boas condições estruturais uma camada de base em solo-cal. Esse sucesso, segundo os autores, provém do bom desempenho apresentado pela camada de base estabilizada. Analisada em laboratório, a mistura com 5% da cal utilizada nessa camada apresentou um valor de RCS de aproximadamente 0,7 MPa (após 60 dias de cura e imersão de 4 horas antes do rompimento).

Araújo (2009) estudou solos do Baixo Jaguaribe, estado do Ceará, que inicialmente não atendiam aos parâmetros do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) para aplicação em pavimentos. Seu estudo analisou 2 tipos de solos (um de Aracati e outro de Morada Nova) estabilizados quimicamente com a cal, em pó e em pasta, com 3%, 5% e 7%.

Os ensaios realizados foram o de RCS, RT e MR e as amostras foram submetidas a um período de cura de 0, 7, 14, 28 e 90 dias. Os resultados obtidos foram positivos, o solo de Aracati apresentou melhores incrementos de resistência após a estabilização com a cal. Assim, um solo antes não aplicável na construção de vias passou a atender aos limites exigidos para uso em camadas granulares de pavimento.

Barros (2011), assim como Araújo (2009), aplicou a técnica de estabilização química com 5% da cal para investigar a estabilização de um Solo Contaminado por Derivados de Petróleo (SCDP) proveniente de uma refinaria na cidade de Fortaleza. Na Tabela 3 podem ser visualizadas as composições das 4 misturas envolvendo um solo argiloso proveniente da RMF, SCDP e cal, agindo como encapsulante dos contaminantes existentes no resíduo. A autora realizou os ensaios de CBR para os tempos de cura de 7, 14 e 28 dias e RCS

nas misturas para os tempos de cura de 7, 14, 28 e 56 dias, além dos ensaios imediatos (sem cura) para ambos os ensaios.

Tabela 3 - Composição das misturas idealizadas por Barros (2011).

Misturas	Solo Natural GUA (%)	Teor de Cal (%)	Teor de SCDP (%)
M1	95	0	5
M2	90	0	10
M3	90	5	5
M4	85	5	10

Fonte: Barros, 2011.

Barros (2011) obteve resultados satisfatórios quanto ao ganho de resistência à penetração, já que o solo que antes possuía um CBR de 3%, com a estabilização granulométrica aumentou sua resistência podendo a mistura ser utilizada em camadas de sub-base de pavimentos, ou seja, possuindo uma CBR acima de 20%. Já para o ensaio de RCS, as misturas que continham cal em sua composição resistiram à imersão de 24 horas em água antes do rompimento, atingindo resistências ascendentes em relação ao tempo de cura e atendendo aos limites estabelecidos pelo *Illinois Highway Department*, citado em Little (1995), sendo 0,689 MPa para sub-bases e 1,034 MPa para materiais estabilizados quimicamente com cal.

2.6 A Técnica de Encapsulamento e alguns Estudos

A técnica de encapsulamento é também conhecida como solidificação/estabilização (S/S do inglês *solidification/stabilization*) por utilizar os dois métodos. A solidificação refere-se ao processo que encapsula o resíduo na forma de um material sólido e restringe a migração de seus contaminantes através da diminuição da área superficial exposta ao processo de lixiviação e solubilização, e/ou reveste os resíduos com materiais de baixa permeabilidade.

Esse método pode ser acompanhado por uma reação química entre o resíduo e o agente encapsulante (solidificante) ou por processos mecânicos. Já a estabilização, refere-se ao processo que envolve reações químicas que reduzem a lixiviabilidade do resíduo. A estabilização química imobiliza materiais perigosos ou reduz a solubilidade deles através de uma reação química (EPA, 2000).

Conforme citado anteriormente, de acordo com a NBR 10.004 da ABNT, os resíduos sólidos podem ser classificados, quanto aos riscos potenciais de contaminação do meio ambiente em: (i) classe I ou Perigosos e (ii) classe II ou Não perigosos, sendo esta última classificação dividida em dois sub-grupos, Não inertes (II A) e Inertes (II B).

Em função de suas características próprias de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade, os resíduos provindos das indústrias petroquímicas, por exemplo, geralmente recebem essa classificação (Classe I) por apresentarem riscos à saúde pública ou ainda por provocarem efeitos adversos ao meio ambiente quando manuseados ou dispostos de forma inadequada. Daí a justificativa de se utilizar o método de encapsulamento.

Existem vários processos de encapsulamento, sendo estes à base de cimento Portland, cal, polímeros, polímeros orgânicos, técnicas de encapsulamento superficial, auto-solidificação, transformação em vidros e/ou cerâmicas e baseadas em argilas naturais modificadas (BRAGA *et al.*, 2002).

As argilas também podem ser aplicadas como material encapsulante de contaminante e são consideradas uma classe especial de agentes encapsulantes encontradas tanto no mercado nacional como no internacional. Segundo Barth (1990), argilas naturais modificadas, tais como bentonitas e atapulgitas, possuem propriedades químicas que favorecem as reações de estabilização, sendo eficazes para remoção de contaminantes orgânicos oleosos do solo ou para a imobilização dos mesmos, antes da disposição em aterros.

As argilas naturais modificadas são produzidas a partir de argilo-silicatos naturais, cuja modificação é feita pela substituição de cátions inorgânicos por cátions orgânicos, por meio de troca iônica. Após a substituição, as moléculas orgânicas são adsorvidas na estrutura cristalina do mineral aumentando sua capacidade adsorviva, o que favorece o surgimento de reações de estabilização quando em contato com contaminantes.

Os agentes mais frequentemente empregados para o encapsulamento são o cimento Portland e a cal. Em termos físicos, o cimento apresenta uma resposta a um intervalo de tempo bem menor que a da cal, visto que sua cura ocorre em menos tempo. Quimicamente, ambos agem de forma a alcalinizar o ambiente, elevando o pH do composto, diminuindo teoricamente a solubilidade dos contaminantes (KNOP, 2003 e CABERLON, 2005).

Uma grande vantagem da técnica de encapsulamento, além de diluir o efeito nocivo do contaminante, é tornar o solo contaminado uma estrutura mais resistente e menos permeável, requisitos imprescindíveis para o emprego de um material em obras de pavimentação.

Além da cal e cimento, mais conhecidos, outros aditivos podem ser utilizados, como a cinza volante, o cloreto de cálcio, o sulfonato de lignina, tendo como resultado o encapsulamento do contaminante, tornando-o menos solúvel e danoso à natureza.

Resumindo, a técnica de encapsulamento é resultado de interações físicas e químicas. A interação física consiste na melhoria das propriedades do material por meio da solidificação, sendo estas a resistência e a permeabilidade, e é nessa parte que ocorre o encapsulamento do contaminante. Já a interação química é a alteração das propriedades químicas do contaminante, reduzindo ou até impossibilitando a lixiviação do mesmo (RUVÉR *et al.*, 2003).

Leandro e Fabbri (2009) aplicaram a técnica de solidificação/estabilização em três solos de diferentes municípios: Jaguaruna, Sangão e Treze de Maio, todos situados no Estado de Santa Catarina e investigaram a possibilidade da aplicação de cinza pesada, para a construção de bases e sub-bases de pavimentos. Na composição das misturas confeccionadas pelos autores há misturas que possuem cal (3%) e outras que não possuem cal, para efeito de comparação. Os ensaios realizados foram os de resistência à compressão simples, de resistência à tração por compressão diametral e de CBR.

Os resultados obtidos por Leandro e Fabbri (2009) indicaram que as misturas de solo-cinza pesada dos três tipos de solos não são adequadas para uso como camadas de pavimentos, mas a adição de 3% de cal melhorou substancialmente o comportamento das misturas solo-cinza, possibilitando o aproveitamento da cinza na construção de pavimentos rodoviários.

Os autores citados no parágrafo anterior ainda estudaram o comportamento das misturas, analisando-as após os períodos de cura de 0, 28 e 84 dias. As adições crescentes de cinza pesada aos solos provocaram a diminuição das resistências à compressão simples e resistência à tração em todos os períodos de cura, sendo que, geralmente, as resistências foram menores para as misturas com maiores quantidades de cinza pesada.

Analisando-se as resistências à compressão simples das misturas de solo+cinza+cal e das misturas de solo+cinza, constatou-se que ocorreram aumentos significativos de resistência após a adição da cal, sendo que geralmente os ganhos de resistência foram tão maiores quanto maior a quantidade de cinza pesada presente nas misturas. Desse modo, pode-se afirmar que há indícios de que esses ganhos maiores para as misturas de solo com cinza após adição de cal se devem às reações ocorridas, principalmente, entre os compostos de cinza e cal.

Quanto à influência da cura nas resistências à tração por compressão diametral das misturas solo-cal, Leandro e Fabbri (2009) observaram que todos os solos apresentaram diminuição de resistência à tração ao longo do tempo, sendo que o mesmo comportamento foi verificado para as misturas de solo-cinza, indicando que não ocorreram reações entre a cinza pesada e os solos que contribuísssem para a melhora do comportamento mecânico das misturas. As adições de 3% de cal provocaram ganhos expressivos de CBR nas misturas solo-cinza, tanto para as misturas contendo o solo laterítico como para as misturas com o solo não laterítico. Entretanto, as misturas do solo não laterítico apresentaram ganhos maiores após a adição de cal do que as misturas do solo laterítico.

Farias (2005) também utilizou a técnica de encapsulamento em resíduo de termelétrica. Primeiramente, o autor analisou os aspectos de comportamento mecânico e ambiental de misturas solo/cinza pesada na pavimentação. O autor utilizou o método de estabilização de solos e avaliou o comportamento geotécnico e as interações ambientais de solos do Município de Tubarão (SC) com cinza pesada da termelétrica Jorge Lacerda, visando o seu emprego em camadas de pavimentos.

Para essa investigação foi elaborado um ensaio piloto visando avaliar a periculosidade da utilização de resíduos em situações similares àquelas que serão submetidos na estrutura do pavimento. O ensaio piloto consistiu na percolação da água da chuva em células contendo diversas misturas de solo e cinza pesada. A partir da percolação de uma solução com características da água da chuva sobre as diversas misturas analisadas, foram observados os elementos potencialmente poluentes presentes no líquido percolado. A percolação foi realizada em uma camada de material com espessura e grau de compactação similares àqueles que são utilizados na estrutura de um pavimento típico de vias urbanas de médio volume de tráfego.

No trabalho de Farias (2005) foram realizados ensaios de compactação, CBR com medida da expansão, RCS e MR. Nas avaliações de interação ambiental foram realizados ensaios de caracterização química, lixiviação, solubilização e posteriormente, foi realizada a classificação quanto ao enquadramento como resíduo sólido industrial. Os resultados obtidos indicaram que tanto o solo estudado quanto a cinza pesada, quando aplicados individualmente, tiveram um péssimo comportamento geotécnico, não sendo, portanto, indicados para camadas granulares de pavimentos. Porém, para todas as misturas ensaiadas, a adição de cinza aumentou o valor da capacidade de suporte do solo, diminuiu a sua expansibilidade e reduziu a massa específica aparente seca.

Ainda com relação ao trabalho desenvolvido por Farias (2005), com a adição de 50% (em peso) de cinza pesada no solo, o valor do CBR saiu de 10,6% (solo natural), aumentando para cerca de 22,6% e a expansão se aproximou de 0,0%, quando antes era de 3,6%. A cinza tornou a mistura não expansiva, pouco sensível à umidade e com a capacidade de suporte apresentada, a mistura poderia ser empregada em camadas de sub-base de uma estrutura de pavimento, notadamente em vias de baixo a médio volume de tráfego.

Nas misturas estabilizadas com a cal, os corpos-de-prova dos ensaios de CBR foram deixados por um período de cura de 4 e 28 dias, visando detectar o desencadeamento de reações cimentantes que elevassem a resistência das misturas analisadas. Analisando-se os resultados, observou-se que a adição de 3% a 4% de cal nas misturas propiciou, mesmo apenas com 4 dias de cura, um substancial aumento no valor de CBR de todas as misturas como mostra a Tabela 4, onde S significa solo e CP significa cinza pesada.

Tabela 4 - Composição das misturas idealizadas por Farias (2005) com seus respectivos CBRs.

Misturas (%)	Teor de cal (%)	CBR 4 dias - sem cal (%)	CBR 4 dias - com cal (%)
S70/CP30	4	19,2	42,8
S50/CP50	3	22,6	35,7
S30/CP70	6	18,8	28,1

Fonte: Elaborada pela autora adaptado de Farias (2005).

Nas misturas solo+cinza pesada+cal deixadas por um período de cura de 28 dias (todas estabilizadas com cal), o autor verificou um ganho de resistência muito significativo em todas as misturas. Na primeira e segunda mistura apresentadas na Tabela 4, ambas com 28 dias de cura, houve superação dos 100% de aumento de CBR em relação às misturas com cura de 4 dias (ambas), passando o CBR da primeira mistura de 42,8% para uma média de 92% e da segunda passando de 28,1% para uma média de 63%.

Os ensaios dinâmicos das misturas solo+cinza pesada+cal mostraram que a cal propiciou um progresso significativo no comportamento resiliente, mesmo com poucos dias de cura. Quanto aos ensaios de RCS, nas composições solo+cinza pesada e solo+cinza pesada+cal (diferentes períodos de cura) mostraram que para todas as misturas os valores aumentaram ao longo do tempo, porém não atingem resistência suficiente para possibilitar o emprego das misturas solo+cinza pesada+cal em camadas de base, já que é necessário alcançar, no mínimo, 2,1 MPa aos 7 dias, segundo a norma da ABNT NBR 12253/1992 (Solo-cimento: Dosagem para emprego como camada de pavimento).

Quando misturados e estabilizados com cal, as misturas apresentaram um comportamento geotécnico satisfatório, podendo, assim serem aplicadas em camadas de sub-base de pavimentos flexíveis. Além de possuir resultados técnicos satisfatórios, a estabilização com cal também é benéfica quanto às interações ambientais, pois os resultados indicaram uma redução nas taxas de lixiviação e solubilização de compostos químicos perigosos presentes na cinza pesada.

Estudos elaborados por Nardi (1975) e Marcon (1977), comprovaram a melhoria no comportamento mecânico de misturas solo+cinza leve (*fly ash*), quando adicionado um composto aglomerante como o cimento e a cal. Farias (2005), como já mencionado, avaliou o comportamento mecânico de misturas solo+cinza pesada estabilizadas com cal (solo+cinza pesada+cal) com dois propósitos básicos.

O primeiro propósito foi avaliar a influência da cal no comportamento mecânico; e o segundo, avaliar a influência da cal nas interações ambientais, uma vez que a cinza é um resíduo sólido Não inerte e Não perigoso e, dessa forma, sendo passível de solubilizar compostos químicos presentes em sua composição quando submetidos à percolação de água. A cal, sendo um composto cimentante, tem a capacidade de imobilizar certos compostos metálicos.

Marcon (1977) desenvolveu sua pesquisa com a finalidade de complementar os estudos realizados por Nardi (1975). Marcon (1977) realizou ensaios de durabilidade (métodos da ABCP e um desenvolvido pelo próprio autor: quociente da resistência dos corpos de prova submetidos a ciclos de molhagem e secagem pela resistência dos corpos de prova curados normalmente em câmara úmida, ambos curados por 90 dias), módulo de elasticidade (estático e dinâmico) e resistência (compressão simples e diametral) em 3 composições de misturas, conforme apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Composição das misturas confeccionadas por Marcon em 1977.

Mistura	Areia (%)	Cinza Volante (%)	Cal (%)	Brita (%)	Cimento (%)
1	83	13	4	-	-
2	83	13	4	-	1*
3	83	13	4	30	1*

Fonte: Elaborada pela autora com base na pesquisa de Marcon (1977).

Nota:

*Esta porcentagem é calculada sobre o peso total seco dos outros componentes da mistura, sendo areia, cinza volante e cal para a mistura 2 e areia, cinza volante, cal e brita para a mistura 3.

Nos resultados dos ensaios citados, os materiais se mostraram aptos para serem empregados em bases e sub-bases de pavimentos, desde que observadas as condições de cura,

as solicitações de tráfego e devendo ainda ser avaliada a rigidez da camada da base, de modo a promover a redução das tensões verticais transmitidas ao subleito e retardando os efeitos de fadiga.

De acordo com resultados dos ensaios realizados por Marcon (1977), o método de encapsulamento mostrou-se eficiente quanto à imobilização dos contaminantes existentes nos resíduos apenas para pequenas quantidades de resíduos. Para quantidades elevadas de contaminantes, a técnica se tornou pouco eficiente, indistintamente do tipo e do teor de agente cimentante adicionado à areia contaminada.

Como já citado, e através da classificação dos resíduos sólidos, a cinza volante é normalmente classificada como um resíduo Não perigoso, porém, Não inerte, possuindo assim a necessidade de alternativas para uma destinação final adequada e ao mesmo tempo (preferível) mais econômica para esse material. Assim, uma alternativa sugerida neste projeto para uma utilização do resíduo é o uso da técnica de estabilização química de solos e o encapsulamento do resíduo utilizando como agente aglomerante a cal.

2.7 Alguns Estudos Nacionais sobre o Emprego de Cinzas de Carvão Mineral

Sabedot *et al.* (2011) avaliaram parâmetros físicos, químicos e mineralógicos de cinzas de carvão, leves e pesadas, oriundas do sul do país. O estudo desenvolvido consistiu de um programa de amostragem e caracterização de cinzas leves e pesadas, com quatro coletas a cada quatro meses, em usinas termelétricas de três empresas (Braskem S/A, CMPC Celulose Riograndense e Tractebel Energia S/A) que queimam carvão mineral produzido e beneficiado na Copelmi.

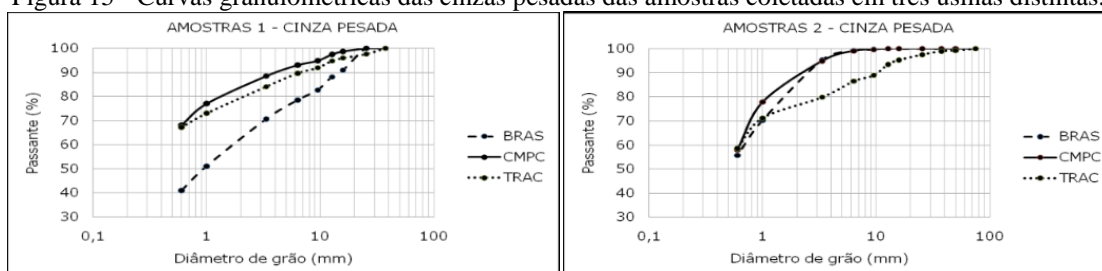
Nas usinas termelétricas, a cinza leve foi coletada em dispositivo de coleta na tubulação que conduz a cinza leve aos silos de armazenamento. A cinza pesada foi coletada em dispositivo de descarte, antes de chegar ao fundo da fornalha. Evidentemente, em ambas as situações, as amostras foram coletadas de rejeitos posteriores à queima do carvão.

Quanto à caracterização física, foram realizados os ensaios de distribuição granulométrica, densidade, colorimetria, índice de Trabalho de Bond (teste de moabilidade) e pH. Já a caracterização química consistiu em identificar os principais óxidos e metais As, Pb, Cr, Cd, Hg e U⁷. E por fim, para a caracterização mineralógica foi realizado o ensaio de difração RX. Os resultados mostraram que as cinzas pesadas são semelhantes nas três usinas

⁷ As: arsênio, Pb: chumbo, Cr: cromo, Cd: cádmio, Hg: mercúrio, U: urânio.

quanto à granulometria, conforme apresentadas na Figura 15. Já as cinzas leves da Braskem e CMPC possuem um D_{50} de 11 μm e 17 μm , respectivamente, enquanto que as cinzas (leves) da Tractebel possui um D_{50} de 50 μm . A densidade real resultou em valores semelhantes para ambas as cinzas, sendo 2,3 g/cm^3 para a cinza pesada e 2,2 g/cm^3 para a cinza leve.

Figura 15 - Curvas granulométricas das cinzas pesadas das amostras coletadas em três usinas distintas.



Fonte: Sabedot *et al.* (2011).

Uma amostra de cinza pesada submetida ao teste de moabilidade, para o cálculo do Índice de Trabalho de Bond (Wi), resultou no valor de 11,9 kWh/t. Esse teste possibilita uma avaliação técnica e econômica para a implantação de processos de moagem de matérias-primas; o valor definido pode ser considerado médio para a natureza do material. Já o pH para a cinza pesada e cinza leve resultou em 9 e 12, respectivamente, indicando que os materiais têm características alcalinas, mais acentuadas nas cinzas leves.

Ao serem submetidas a uma análise química, as cinzas pesadas da Braskem e CMPC possuíram um percentual elevado de carbono (C) em suas amostras, indicando possíveis problemas durante a queima de carvão. Alguns elementos foram analisados em uma amostra de cinza leve e uma de cinza pesada. Elementos como Cd, Hg e U ficaram abaixo do limite de periculosidade, de acordo com a norma ABNT NBR 10.004/2004, se enquadrando, assim, como resíduo de Classe II. Os elementos As, Pb e Cr total tiveram valores que os enquadram em resíduos de Classe I da referida norma.

Quanto à caracterização mineralógica, amostras de carvão, de cinzas pesadas e de cinzas leves foram analisadas em difratômetro de raios-X. Quartzo, caulinita e calcita são os minerais associados ao carvão. Nas cinzas pesadas, quartzo, mulita, plagioclásio e calcita são os minerais encontrados, enquanto que a cinza leve possui apenas quartzo e mulita.

O artigo escrito por Sabedot *et al.* (2011) mostra e analisa os resultados da pesquisa e comenta sobre possíveis usos das cinzas (leves e pesadas) como matéria-prima para a construção civil, indústria cimenteira, indústria cerâmica, indústria de filtros, indústria de blocos e tijolos e pavimentação rodoviária.

Camara (2011) estudou o comportamento de materiais alternativos (cinzas de carvão mineral) e avaliou suas aplicações na Engenharia Geotécnica. O objetivo principal da autora foi verificar a viabilidade do aproveitamento das cinzas (leve e pesada) em misturas com solo regional do município do Rio de Janeiro, verificando se tal prática pode trazer benefícios a esse solo através de ensaios laboratoriais, avaliando também, o efeito das cinzas sobre a microbiota (microorganismos que têm funções importantes na decomposição da matéria orgânica) de um solo tropical.

Ambas as cinzas, leve e pesada, foram provenientes do processo de queima do carvão mineral, originárias do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, localizado no município de Capivari de Baixo, no Estado de Santa Catarina. O Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, atualmente é considerado o maior complexo termelétrico movido a carvão mineral da América Latina. Pertence à Companhia Tractebel Energia, que por sua vez, faz parte do Grupo Franco-Belga GDF-Suez. O complexo é composto por três usinas termelétricas com capacidade de produção instalada de 857 Megawatts (CAMARA, 2011).

Os principais componentes das cinzas coletadas no Complexo Termelétrico, tanto de fundo (cinza pesada ou *bottom ash*) quanto volante (cinza leve ou *fly ash*), são o silício, alumínio e ferro. A representatividade destes elementos foi mantida nas misturas estudadas, de onde pode se concluir que tais elementos químicos também devem estar presentes em grande quantidade no solo utilizado, sendo assim, participantes ativos do processo de estabilização.

Para realização das misturas utilizou-se o solo coluvionar proveniente da área experimental da PUC-Rio. As características do solo foram obtidas através de ensaios realizados no laboratório de geotecnia da PUC-Rio em março de 2011. Concluiu-se que o solo ensaiado é uma argila silto-arenosa e para se verificar a atividade da microbiota (população de microorganismos que vivem nos solos desempenhando diversas funções, como a produção de nutrientes), foram montados microcosmos (béqueres contendo solo) com 1,5 Kg de solo deformado, o primeiro com 5% de cinzas volantes, o segundo com 5% de cinzas de fundo e o terceiro com microcosmos contendo solo sem tratamento para servir de referência. O monitoramento se fez por análise do potencial microbiano de degradação, da síntese de carbono microbiano, das variações de carbono disponível, assim como de pH e de teor de umidade do solo.

A adição de 5% de cinzas (leve e pesada) ao solo não alterou significativamente a composição e atividade da microbiota, parecendo, portanto, adequada para fins de engenharia no solo estudado. Além disso, a adição das cinzas não alterou significativamente o pH do

solo, reforçando a possibilidade de uso da mistura em obras rodoviárias. O teor de umidade apresentou pouca alteração.

Oliveira (2011) caracterizou fisicamente e quimicamente 8 misturas com diferentes teores de solo+cinza de carvão mineral (volante e pesada), provenientes do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, localizado no município catarinense de Capivari de Baixo, e avaliou o potencial de utilização dessas cinzas em misturas com um solo regional do bairro de Campo Grande – RJ para aplicação em base e sub-base de pavimentos rodoviários.

O Complexo Termelétrico Jorge Lacerda possui o maior potencial termelétrico a carvão da América Latina, pertencendo ao Grupo Tractebel Energia, a maior geradora privada de energia do Brasil, e é composto por três usinas do tipo convencional que utilizam o carvão mineral com baixo poder calorífico (4.500 kcal/kg), e conseqüentemente, alto teor de cinzas (43%), como combustível para geração de energia.

Oliveira (2011) compôs 8 misturas com e sem a adição de cal. A cal utilizada foi cal hidratada calcítica, do tipo CH-III. As misturas foram nomeadas com a seguinte simbologia: S significa solo, CF significa cinza de fundo, CV significa cinza volante e somente a letra C significa cal. Os números que seguem essas letras significam o teor do componente. Sendo assim, as misturas são S70/CF27/C3, S60/CF37/C3, S90/CV7/C3, S80/CV17/C3, S70/CF30, S60/CF40, S90/CV10 e S80/CV20.

Os ensaios laboratoriais realizados para caracterização do solo e do solo-cinza-cal quanto às propriedades físicas e de classificação dos materiais foram: limites de Atterberg, massa específica real dos grãos e análise granulométrica. Quanto às propriedades químicas foram realizados: fluorescência de raio-X por energia dispersiva, determinação de matéria orgânica, solubilização e lixiviação. Já quanto às propriedades mecânicas foram avaliados: compactação, módulo de resiliência e deformação permanente.

Os dois tipos de cinza (leve e pesada) foram classificados como resíduos Classe II, ou seja, resíduos Não perigosos. Os resultados do ensaio de lixiviação (NBR 10.005/2004) obtiveram concentrações inferiores aos limites permitidos por norma (NBR 10.004/2004). A cinza de fundo foi classificada pela autora como resíduo Inerte (Classe II B). Já a cinza volante, foi classificada como resíduo Não inerte (Classe II A) por ter apresentado concentrações superiores às máximas permitidas para resíduos considerados inertes, dos elementos químicos Alumínio, Fluoretos e Fenóis Totais, no ensaio de solubilização.

A classificação das cinzas volantes em resíduo Não inerte não reprova sua utilização como agente cimentante em misturas com o solo, considerando que no ensaio de lixiviação, que representa a infiltração das águas das chuvas no solo, todos os parâmetros

analisados encontraram-se dentro dos limites permitidos, podendo assim, ser aplicadas em camadas granulares de pavimentos.

Lopes (2011) caracterizou dois tipos de cinzas (volante e pesada) e através das misturas dessas cinzas com solo areno-siltoso não laterítico, característico do estado do Rio de Janeiro, foram realizados ensaios de caracterização física (granulometria e limites de Atterberg), química (fluorescência de raio-X por energia dispersiva), mecânica (compactação, MR e deformação permanente) e ensaios ambientais de lixiviação e solubilização. Tais ensaios foram realizados para o solo puro e para as misturas de solo-cinza pesada (30% e 40% de cinza) e solo-cinza volante (10% e 20% de cinza), sendo esses teores relacionados ao peso do solo seco. Além dos CPs com adição de 3% da cal curados: S70/CF27/C3, S60/CF37/C3, S90/CV7/C3 e S80/CV17/C3, onde S significa solo, CF significa cinza de fundo, CV significa cinza volante e somente a letra C significa cal.

Os resultados de MR comprovaram a influência do tempo de cura, tipo e teor de cinzas e cal. A cura foi um fator de forte influência para as misturas com presença de cal, entretanto, nas misturas sem adição da cal foi observado que o tempo de cura não influenciou o ganho de resistência. Quanto ao tipo e teor de cinzas, as volantes apresentaram ganhos nos valores de MR mais representativos do que as cinzas pesadas, principalmente nas misturas com presença de cal, entretanto, os resultados com as cinzas pesadas também foram satisfatórios. Já com as misturas sem a adição da cal, as cinzas pesadas obtiveram melhor desempenho quanto ao MR.

Assim como nos resultados de MR, o tempo de cura nos resultados de deformação permanente foi fator influente de forma positiva, diminuindo os valores apresentados em todas as misturas estudadas. Além disso, assim como Oliveira (2011), Lopes (2011) também obteve para suas cinzas pesadas e leves, a classificação de Classe II B – resíduo Inerte e Classe II A – resíduo Não inerte, respectivamente. Em uma análise geral dos resultados de MR e deformação permanente, pode-se afirmar que a mistura com menor teor de cinza volante, S90/CV7/C3, obteve os melhores resultados.

2.8 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados alguns conceitos necessários para o entendimento da pesquisa desenvolvida. Inicialmente foi feito um breve relato sobre o cenário socioeconômico no Brasil e no Ceará e o crescimento da industrialização e como consequência dessa expansão, também foi mencionado o aumento na geração de resíduos.

Foi abordado o processo de funcionamento das termelétricas, sendo detalhado o carvão como tipo de combustível utilizado e os tipos de resíduos gerados.

Em seguida, foram mostradas e definidas técnicas que poderiam ser aplicadas para remediar possíveis efeitos nocivos das cinzas leves, destacando-se a técnica de encapsulamento.

Também foram apresentados alguns estudos que utilizaram as técnicas de misturas de solo+cinza+aditivo, algumas considerações sobre estabilização de solos com finalidades rodoviárias, bem como a técnica de solo-cal.

No próximo capítulo são apresentados os materiais utilizados, o programa experimental e a metodologia adotada na presente pesquisa.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados na pesquisa, sendo estes, a cinza volante, proveniente da termelétrica Energia Pecém, a cal agindo como possível agente encapsulante e um solo arenoso proveniente da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF). Em seguida, é apresentada a metodologia aplicada para que os objetivos propostos sejam alcançados, bem como o programa experimental adotado. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP) situado no Departamento de Transportes (DET) da UFC.

3.2 Materiais Empregados

3.2.1 Cinza Volante de Carvão Mineral

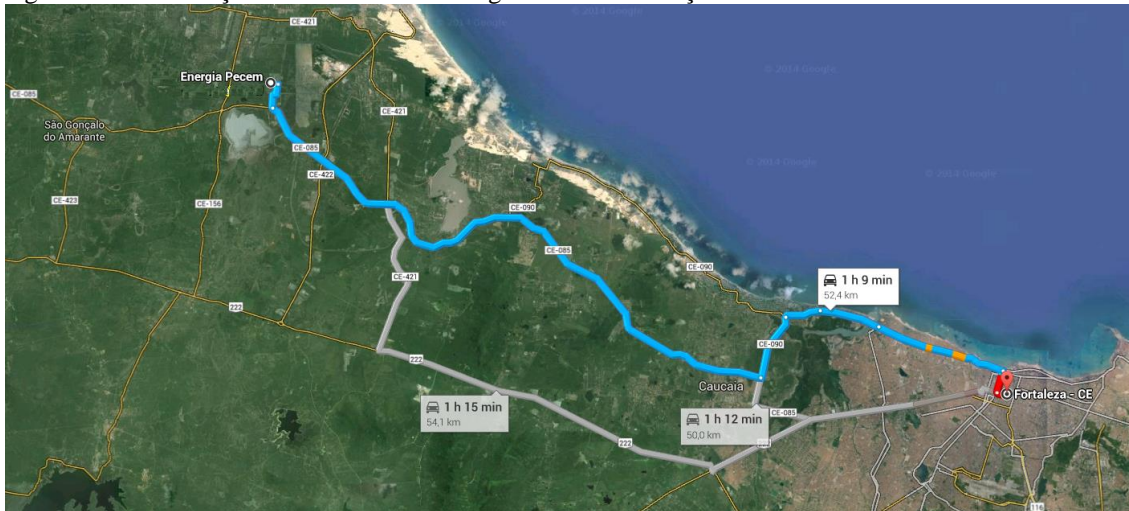
A cinza volante estudada nesta pesquisa foi coletada na termelétrica (Figura 16), também conhecida como UTE Pecém I (Unidade Termelétrica), localizada dentro do Complexo Industrial e Portuário do Pecém que se situa no município de São Gonçalo do Amarante, na RMF, distante aproximadamente 50 Km da cidade de Fortaleza, capital do Estado do Ceará, conforme pode ser visualizado na Figura 17.

Figura 16 - Detalhe dos limites da Termelétrica Energia Pecém, acesso pela CE-085 (destacada em azul).



Fonte: Google Maps (outubro/2014).

Figura 17 - Localização da Termelétrica Energia Pecém em relação à cidade de Fortaleza.



Fonte: Google Maps (outubro/2014).

O aspecto visual da cinza leve (*fly ash*) usada para elaboração desta pesquisa pode ser visualizado na Figura 18. Observa-se que ela tem um aspecto visual parecido com o cimento, sendo um material bem fino ao toque das mãos.

Figura 18 - Aspecto visual da cinza volante coletada na Termelétrica Energia Pecém.



Fonte: Elaborada pela autora.

3.2.2 Solo

O solo utilizado na pesquisa para compor as misturas foi proveniente da RMF. A metodologia de escolha do solo consistiu em traçar um raio de 50 Km tomando como centro a termelétrica Energia Pecém, conforme mostra a Figura 19. A área abrange 6 municípios da RMF, São Gonçalo do Amarante, Caucaia e Maracanaú em sua totalidade e boa parte de Fortaleza, Pacatuba e Maranguape. O solo utilizado na pesquisa está dentro da área do círculo traçado, distando 28,9 Km da localização da Termelétrica Energia Pecém que produz o resíduo estudado.

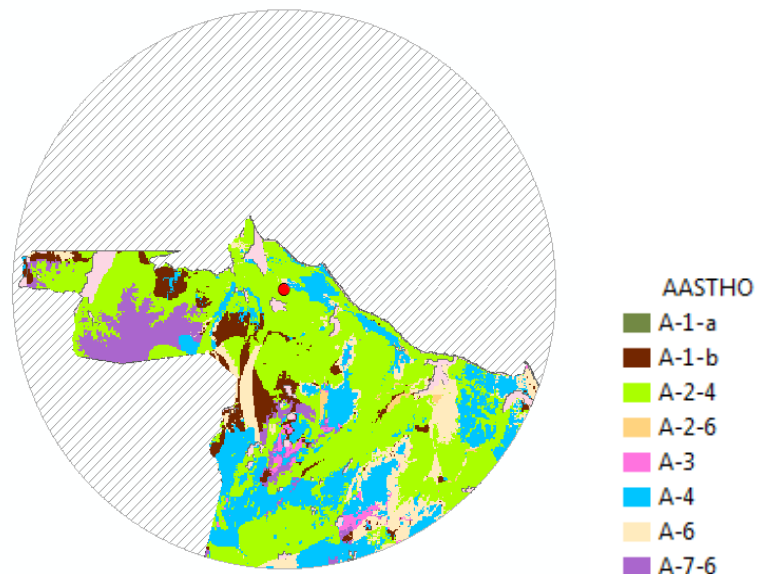
Figura 19 - Delimitação da área de escolha do solo estudado na pesquisa com a RMF antiga.



Fonte: Produzido pelo Msc. Antônio Júnior Alves Ribeiro, 2014.

Após definida a área onde o solo deve estar localizado, possuindo 2.825 Km², foi analisado um mapa que mostrou as classes predominantes na região de acordo com a classificação AASTHO de solos (ver Tabela 6). Pode-se verificar visualmente, conforme mostra a Figura 20 que o solo do tipo A-2-4 é predominante na região destacada.

Figura 20 - Mapa indicando a predominância de cada tipo de solo segundo a classificação AASTHO dentro da região destacada de escolha do solo para composição das misturas.



Fonte: Produzido pelo Msc. Antônio Júnior Alves Ribeiro, 2014.

O solo A-2-4 é uma subdivisão do solo A-2, este tipo de solo se classifica como areias em que os finos presentes constituem a característica secundária. As subdivisões ocorrem em função dos índices de consistência, ou seja, a porcentagem de finos. Desta forma, o solo do tipo A-2-4 é granular que apresenta 35% ou menos de material passante na peneira #200 (0,075 mm) e cuja fração passante na peneira #40 (0,42 mm) apresenta características dos solos A-4, ou seja, características siltosas. Possuindo um valor de $LL \leq 40\%$ e $IP \leq 10$, este solo é classificado como uma areia siltosa (chamada de SM – *sand mo*¹) conforme mostrado na Tabela 6. Assim foi selecionado o solo A-2-4 como material constituinte das misturas estudadas nesta pesquisa por possuir maior ocorrência na região delimitada.

Tabela 6 - Classificação de solos TRB - AASHTO (*Transportation Research Board - American Association of State Highway and Transportation Officials*).

CLASSIFICAÇÃO GERAL	MATERIAIS GRANULARES (35% OU MENOS PASSANDO NA PENEIRA Nº 200)							MATERIAIS SILTO-ARGILOSOS (MAIS DE 35% PASSANDO NA PENEIRA Nº 200)				
	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7	
Classificação de grupos	A - 1 - a	A - 1 - b		A - 2 - 4	A - 2 - 5	A - 2 - 6	A - 2 - 7				A - 7 - 5	A - 7 - 6
Granulometria % passando na peneira: nº 10 (2,0 mm) nº 40 (0,42 mm) nº 200 (0,074 mm)	50 máx. 30 máx. 15 máx.	30 máx. 25 máx.	51 mín. 10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	
Característica da fração passando na peneira nº 40: Limite de Liquidez (%) Índice de Plasticidade (%)	6 máx.	6 máx.	NP	40 máx. 10 máx.	41 mín. 10 máx.	40 máx. 11 mín.	41 mín. 11 mín.	40 máx. 10 máx.	41 mín. 10 máx.	40 máx. 11 mín.	41 mín. 11 mín.	
Índice de Grupo (IG)	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.	
Materiais Constituintes	Fragmentos de pedra, pedregulho fino e areia		Areia fina	Pedregulhos ou areia siltosa ou argilosa				Solos siltosos		Solos argilosos		
Comportamento como subleito	Excelente a bom							Sofrível a mau				

Fonte: Manual de Pavimentação - DNIT, 2006.

Nota:

*O IP do grupo A - 7 - 5 é igual ou menor do que o LL menos 30; se maior será A - 7 - 6.

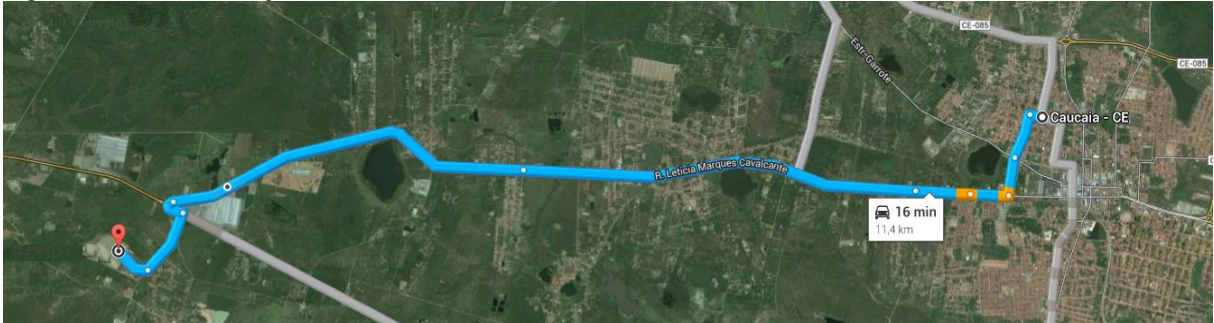
BASTOS (2013) estudou alguns solos da RMF em sua pesquisa, inclusive solos do tipo A-2-4, assim foi coletado um solo da mesma jazida que a autora coletou, pertencente essa jazida ao município de Caucaia.

As Figuras 21 e 22 mostram, respectivamente, a distância da jazida até o Centro de Caucaia (distanto 11,4 Km) e a localização da jazida com as devidas coordenadas. O ponto exato da jazida foi georreferenciado, fornecendo as seguintes coordenadas: 3°44'26.513''S e

¹ *sand mo*: areia siltosa, pela classificação SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos), onde *sand* é areia em inglês e *mo* é silte em sueco.

$38^{\circ}44'57.198''\text{W}$ ou -3.7406981 e -38.7492217 . A Figura 23 mostra o aspecto visual do solo no dia da coleta.

Figura 21 - Distância da jazida até o centro de Caucaia.



Fonte: Google Maps, 2014.

Figura 22 - Localização da jazida com as suas coordenadas.



Fonte: Google Maps, 2014.

Figura 23 - Aspecto visual do solo A-2-4 localizado no município de Caucaia.



Fonte: Elaborada pela autora.

Com relação às classes pedológicas, segundo o Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará (IPECE, 2014), a região da termelétrica situa-se sobre solos do tipo Aluviais, Areias Quartzosas Marinhas, Latossolo Vermelho-Amarelo, Planossolo Solódico, Podzólico Vermelho-Amarelo e Solonchak.

3.2.3 Estabilizante

A definição do estabilizante utilizado na pesquisa foi baseada na literatura. Observou-se que muitas pesquisas que estudaram a utilização de cinzas volantes utilizaram-se da cal como agente estabilizante/encapsulante em razão da granulometria da própria cinza. Selecionou-se, então uma cal hidratada para ser adicionada às misturas solo+cinza no teor de 5%. Esse teor foi selecionado em função de outros estudos, Araújo (2009) e Loiola e Barroso (2007), já realizados para solos do estado do Ceará, apontarem esse teor como sendo adequado.

A cal utilizada nas misturas foi uma cal comercial do tipo 1 – CH1 e contém as mesmas características da cal utilizada por Barros (2011) em sua pesquisa. A cal utilizada nesta pesquisa e na pesquisa de Barros (2011) foi fornecida pela fábrica Carbomil Química S/A. A Tabela 7 mostra as composições químicas do estabilizante, fornecidas pelo fabricante.

Tabela 7 - Composição química da cal utilizada na pesquisa fornecida pelo fabricante.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA - CAL HIDRATADA CH1					
PPC*	Ca(OH) ₂	MgO	RI* (Insolúvel em HCL)	SiO ₂	R ₂ O ₃
23% - 25%	92,5% - 98,5%	3,5% máx	0,5% máx	0,3% máx	1,5% máx

Fonte: Barros, 2011.

Nota:

*PPC – Perda por Calcinação

*RI – Resíduo Insolúvel

3.3 Definição das Misturas Realizadas

Inicialmente foram moldadas 5 misturas para se analisar o efeito da estabilização granulométrica. A proposta dessas misturas também foi baseada na literatura. Em seguida, selecionou-se duas misturas (aquelas que apresentaram os melhores resultados técnicos) que tiveram adicionadas em sua composição o teor fixo de 5% de cal (teor escolhido com base na literatura).

As misturas idealizadas neste estudo foram denominadas conforme mostra a Tabela 8, sendo S, o solo A-2-4 natural da RMF, especificamente de Caucaia, CV corresponde à cinza volante e o número que antecede a sigla do material, sendo a sua porcentagem constituinte na composição. A Tabela 8 apresenta a composição das misturas com maior clareza.

Tabela 8 - Composição das misturas para se avaliar o efeito da estabilização granulométrica.

Misturas	Composição (%)	
	Solo (S)	Cinza Volante (CV)
M1 (100S+0CV)	100	0
M2 (70S+30CV)	70	30
M3 (50S+50CV)	50	50
M4 (30S+70CV)	30	70
M5 (0S+100CV)	0	100

Fonte: Elaborada pela autora.

Os altos teores de cinza foram escolhidos visando utilizar o máximo possível a quantidade de cinza disponível, embora, do ponto de vista ambiental, seu uso *in natura* em camadas granulares do pavimento tenha sido desaconselhado, já que em seu estado natural através do Relatório dos ensaios ambientais realizados em março de 2014 de Extratos Lixiviados e Solubilizados fornecidos pela termelétrica (Anexo) foram detectados alguns elementos (alumínio, arsênio, cromo, fluoreto, selênio e sulfato) que se apresentaram em quantidades superiores às estabelecidas pelas normas, classificando assim, o material como Classe II A – Não inerte.

A classificação da cinza volante como Classe II A, não a desclassifica como agente cimentante em misturas com solo, já que, considerando o ensaio de Extrato Lixiviado, que representa a infiltração das águas das chuvas no solo, todos os parâmetros analisados encontraram-se dentro dos limites permitidos.

As misturas confeccionadas foram submetidas aos ensaios de Índice de Suporte Califórnia (CBR), Módulo de Resiliência (MR), Resistência à Compressão Simples (RCS) e Resistência à Tração (RT) sem efeito de cura, ou seja, foram rompidos logo após a moldagem, considerando-se apenas o tempo de rompimento dos CPs, para cada ensaio. Para os ensaios de CBR, RCS e RT, estes foram submetidos à imersão de 96 horas para o CBR e de 24 horas para RCS e RT para posterior ruptura.

Dentre essas 5 misturas ensaiadas foram escolhidas 2 misturas que obtiveram melhores resultados quanto ao desempenho técnico. Para as estas 2 melhores misturas foi adicionado um teor fixo de 5% de cal. Essas misturas foram submetidas aos mesmos ensaios citados no parágrafo anterior (CBR, MR, RCS e RT), considerando-se o efeito da cura de 0, 7, 14 e 28 dias.

3.4 Programa Experimental

Foram idealizadas misturas compostas em teores pré-definidos dos materiais descritos nos itens anteriores: cinza volante (CV)+solo (S) e cinza volante (CV)+solo (S)+cal (Cal), com o objetivo de poder avaliar a reação das cinzas às misturas com e sem cal. Após a preparação das misturas, realizou-se o ensaio de compactação para que se pudesse prosseguir com os demais ensaios previstos no programa experimental.

3.4.1 Preparação das misturas

A preparação das misturas para os ensaios realizados se deu da seguinte forma: (i) foi colocado o solo natural em uma bandeja, (ii) adicionou-se a cinza e fez-se a uniformização desses dois materiais, (iii) foi adicionada a cal em pó (somente para as duas melhores avaliadas) e uniformizou-se novamente a mistura e (iv) adicionou-se água necessária para se obter o teor ótimo de umidade de cada uma das misturas. As Figuras 24 e 25 mostram os materiais usados na pesquisa e o processo de homogeneização dos mesmos, respectivamente.

Figura 24 - Materiais utilizados: Solo, Cinza Volante e Cal.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 25 - Preparação das misturas.



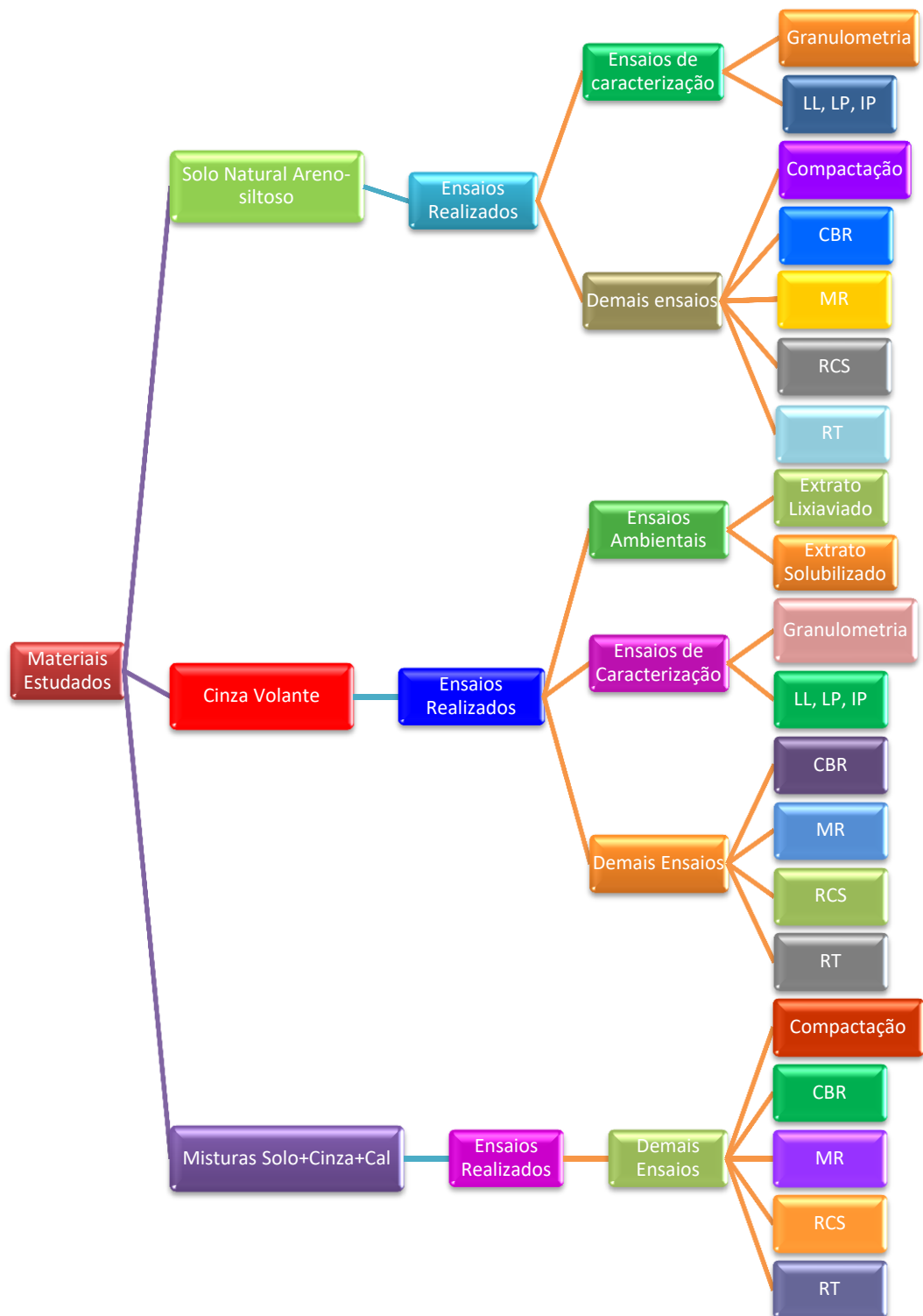
Fonte: Elaborada pela autora.

Finalizado o procedimento de homogeneização dos materiais, foi possível prosseguir para a realização dos ensaios inicialmente idealizados.

3.4.2 Fluxograma do Programa Experimental

Após terem sido fabricadas, as misturas foram, inicialmente, submetidas ao ensaio de compactação, sendo possível determinar a umidade ótima e a massa específica seca máxima de cada mistura. Com os resultados desse ensaio procedeu-se com os demais ensaios contidos no programa experimental. A Figura 26 mostra um fluxograma do programa experimental.

Figura 26 - Fluxograma do programa experimental realizado.



Fonte: Elaborada pela autora.

Como citado anteriormente, as misturas estabilizadas com cal foram submetidas aos ensaios de resistência CBR, MR, RCS e RT sob o efeito dos tempos de cura 0, 7, 14 e 28 dias. A cura foi usada se avaliar o ganho de resistência com o passar do tempo, bem como

comprovar ou não o encapsulamento de componentes possivelmente contaminantes presentes nas misturas.

Os corpos de prova (CPs) dos ensaios de MR, RCS e RT, após serem moldados, foram envolvidos com papel filme e foram acomodados numa sala climatizada 24h/dia para evitar a perda de umidade até o dia da realização dos referidos ensaios. Para os ensaios de CBR o material, ainda dentro do cilindro, ficou envolvido em um saco plástico bem vedado até completar o tempo necessário de cura e somente depois é que foi realizada a imersão por mais 96 horas (4 dias) para posterior rompimento dos CPs.

3.5 Ensaios Realizados no Solo Natural

Os ensaios de caracterização do solo são apresentados na Tabela 9, bem como as normas e métodos utilizados para execução dos mesmos. Os resultados da caracterização estão expostos no próximo capítulo.

Tabela 9 - Ensaios realizados no solo de Caucaia.

Ensaios	Métodos
LL	DNER-ME 122/1994
LP	DNER-ME 082/1994
Densidade Real	DNER-ME 093/1994
Granulometria	DNER-ME 051/1994
Compactação	DNER-ME 162/1994
CBR	DNER-ME 049/1994
MR	DNIT-ME 134/2010
RCS	DNER-ME 180/1994
RT	DNER-ME 181/1994

Fonte: Elaborada pela autora.

3.6 Ensaios Realizados na Cinza Volante

3.6.1 Ensaios Mecânicos de Caracterização

Todos os ensaios de caracterização realizados no solo natural também foram realizados na cinza volante sendo utilizadas as mesmas normas citadas na Tabela 9 do item anterior.

A análise granulométrica da cinza foi realizada apenas por sedimentação, já que todo o material constituinte da cinza passa na peneira de #200 (0,075 mm). Antes da

realização do ensaio, o material foi seco em estufa. Os resultados da caracterização estão expostos no próximo capítulo.

3.6.2 *Ensaio Ambientais – Extrato Lixiviado e Extrato Solubilizado*

Os ensaios de Extrato Lixiviado e Extrato Solubilizado foram realizados pelo laboratório Biogri – *a Mérieux NutriSciences Company*, de acordo com a norma da ABNT, NBR 10.004/2004 (Resíduos Sólidos – Classificação) que recomenda o uso das normas NBR 10.005/2004 (Anexo F) – Lixiviação e NBR 10.006/2004 (Anexo G) – Solubilização. O Relatório completo fornecido pela termelétrica fornecedora da cinza volante desta pesquisa está no Anexo desta dissertação para maiores informações.

3.7 Ensaio Realizados nas Misturas

3.7.1 *Compactação*

As misturas foram submetidas ao ensaio de compactação Proctor na energia intermediária (26 golpes), realizado de acordo com a DNER – ME 162/94 (Solos – Ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas). A partir desse ensaio foram determinadas as umidades ótimas e as densidades máximas de cada mistura.

Escolheu-se trabalhar com a energia intermediária de compactação, pelo fato desta ser a energia mais utilizada para construção de camadas de bases rodoviárias de misturas de solos estabilizados.

3.7.2 *Índice de Suporte de Califórnia – CBR*

Para avaliar a resistência à penetração das misturas deste estudo, foram realizados ensaios de CBR para cada uma delas. Devido ao uso da cal como agente estabilizante, este ensaio foi realizado com períodos de cura de 7, 14 e 28 dias, além de ser ensaiado também de imediato, sem cura.

Apesar de não existirem indicações em normas técnicas de que são necessários tempos de cura para o ensaio de CBR, optou-se por fazer essa análise nas misturas desta pesquisa pelo fato de se trabalhar com o processo de estabilização, podendo assim verificar o seu efeito em diferentes tempos de cura. Contudo, sabe-se que esse ensaio no caso de misturas

estabilizadas quimicamente serve apenas para se ter um indicativo do aumento ou decréscimo de resistência com uso de um estabilizante. O parâmetro CBR não serve para dimensionamento de camadas granulares estabilizadas quimicamente.

Os corpos de prova foram moldados segundo o DNER – ME 049/94 (Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas). Para evitar a perda de umidade para o ambiente, os cilindros ficaram envolvidos em sacos plásticos bem vedados e permaneceram assim durante o tempo de cura até o dia de serem imersos em água durante 96 horas antes do rompimento. Foram moldados três CPs para cada mistura, referente a cada tempo de cura a fim de se ter uma média para cada resultado.

3.7.3 Módulo de Resiliência - MR

Para a realização do ensaio do módulo de resiliência foi utilizado o método da resiliência da COPPE/UFRJ normatizado através da Norma do DNIT 134/2010 que se utiliza de equipamento triaxial de carga repetida em laboratório. O material a ser ensaiado foi compactado nas condições representativas, com altura de pelo menos duas vezes o diâmetro. Foi empregado CPs de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura.

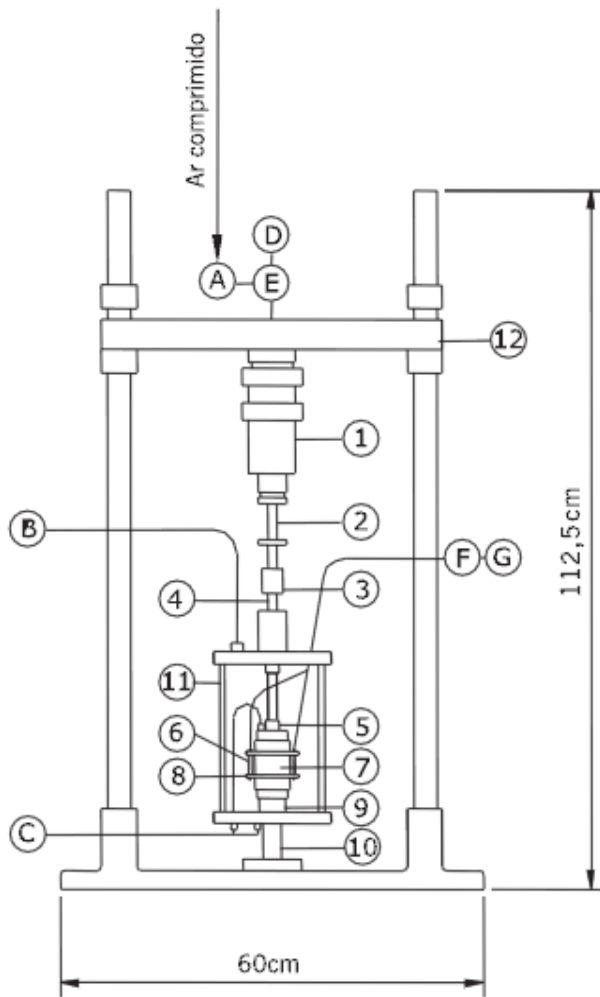
Os materiais foram misturados sempre no dia anterior a serem moldados. Após a moldagem no cilindro tripartido (ver Figura 27), os CPs (3 para cada tempo de cura e misturas diferentes) foram envolvidos em papel filme até o dia de serem rompidos, utilizando o equipamento ilustrado na Figura 28. A Figura 29 mostra como são aplicadas as tensões no CP e ilustra como ocorre a deformação recuperável do mesmo, bem como é obtido o MR. Além de serem submetidos ao ensaio, sem cura, os CPs (foram moldados CPs diferentes para cada tempo de cura) das misturas também foram submetidos ao ensaio nos períodos de 7, 14 e 28 dias, a fim de verificar o efeito da cura.

Figura 27 - Cilindro tripartido utilizado para moldagem de CPs para os ensaios de MR, RCS e RT.



Fonte: Elaborada pela autora.

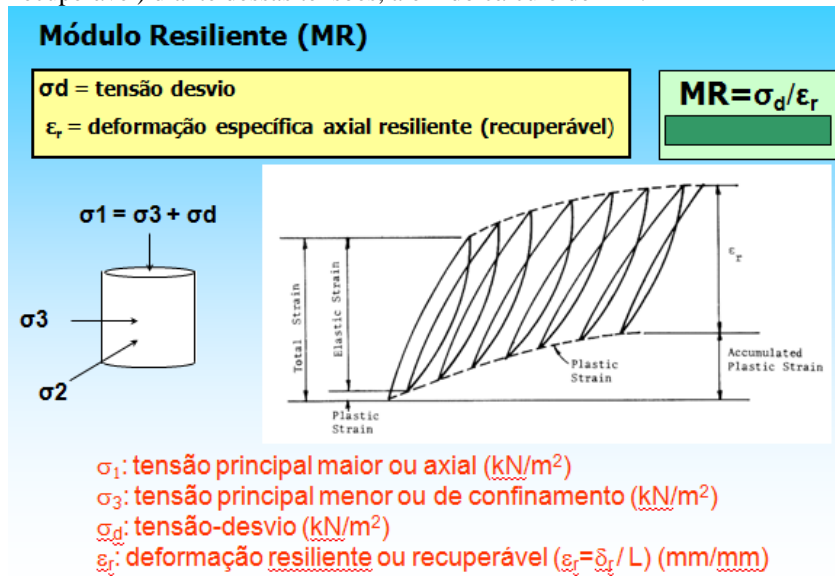
Figura 28 - Equipamento triaxial de carga repetida do Brasil.



- A – regulador de pressão para aplicação da tensão-desvio
 B – regulador de pressão para aplicação da tensão confinante
 C – sistema de vácuo
 D – temporizador de controle da frequência e tempo de duração do carregamento (tensão-desvio)
 E – válvula de três vias
 F – amplificador de sinal
 G – oscilógrafo ou microcomputador com monitor e impressora
1. cilindro de pressão
 2. pistão
 3. conexão
 4. haste
 5. cabeçote (top-cap)
 6. LVDT transdutor de deslocamento
 7. amostra de solo
 8. alça de fixação dos LVDTs
 9. base
 10. suporte central
 11. célula triaxial
 12. estrutura da prensa

Fonte: BERNUCCI *et al.*, 2010.

Figura 29 - Tensões aplicadas ao CP e comportamento do mesmo (deformação recuperável) diante dessas tensões, além do cálculo de MR.



Fonte: Notas de Aula de Barroso, S. (Petran), 2013.

3.7.4 Resistência à Compressão Simples – RCS

Este ensaio foi realizado segundo a norma DNER – ME 180/94 (Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – determinação da resistência à compressão simples). O ensaio de RCS também adota o cilindro tripartido para a moldagem dos CPs. Como forma de evitar a perda de umidade, os CPs (3 para cada tempo de cura e misturas diferentes) foram envolvidos em papel filme até o dia de serem imersos em água durante as 24 horas antes do rompimento. Para verificar o efeito da cura, as misturas também foram submetidas ao ensaio de RCS, sem cura e nos períodos de 7, 14 e 28 dias.

3.7.5 Resistência à Tração por compressão diametral – RT

Este ensaio foi realizado segundo a norma DNER – ME 181/94 (Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – determinação da resistência à tração por compressão diametral). Assim, como os CPs de MR e RCS, os CPs de RT também foram moldados no cilindro tripartido e como forma de evitar a perda de umidade, os CPs (3 para cada tempo de cura e misturas diferentes) também foram envolvidos em papel filme até o dia de serem rompidos.

O ensaio de RT pode ser realizado por dois métodos, o direto e o indireto. O método direto é aquele que efetivamente submete o solo à tração, medindo diretamente o valor durante o ensaio em uma amostra cilíndrica tracionada ao longo de sua geratriz. Já o método indireto usa da aplicação de outros tipos de esforços que não são de tração e interpretam os resultados, obtendo indiretamente o valor desejado (VILLAR, de CAMPOS e ZORNBERG, 2007).

O ensaio de RT desta pesquisa utilizou-se do método indireto através do ensaio de resistência à compressão diametral, ou seja, o CP foi comprimido axialmente, conforme mostra a Figura 30.

Figura 30 - Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT) em CPs cilíndricos.



Fonte: slideplayer.com.br, 2015.

3.8 Análise da Melhor Mistura no CAP3D

Com o intuito de comprovar a utilização da melhor mistura, foi proposta a substituição de uma camada de base de uma estrutura real pela melhor mistura testada com a finalidade de comparar os benefícios adquiridos com essa substituição.

No programa CAP3D foi analisada a estrutura real e dentre os produtos da análise foram coletados os dados das tensões verticais, deformações horizontais e deslocamentos ocorridos a cada centímetro de profundidade da estrutura. Em seguida, manteve-se a mesma estrutura, substituindo-se a camada de base pela base composta pela melhor mistura testada e coletados os mesmos parâmetros. Foi possível plotar os gráficos de Tensões Verticais x Profundidade e Deformações Horizontais x Profundidade.

É importante avaliar esses parâmetros, já que em um projeto de pavimentos flexíveis, eles indicam o quão problemática ou não pode ser uma estrutura, estimando a expectativa do desempenho deste pavimento quanto à vida de fadiga e ocorrência de deformações permanentes excessivas. Os pontos críticos de uma estrutura que devem ser observados (sob a ação de cargas do tráfego) afim de que se possa avaliar os defeitos citados é o deslocamento vertical da superfície que possibilita avaliar a fadiga, as tensões/deformações de tração na fibra inferior do revestimento para avaliar a fissuração por fadiga e as tensões/deformações verticais de compressão no topo do subleito para avaliar a deformação permanente.

3.9 Considerações Finais

Neste capítulo foi mostrada a metodologia utilizada na presente pesquisa. Foram especificados os materiais utilizados e como foram realizadas as suas caracterizações, as composições das misturas e os ensaios aos quais as mesmas foram submetidas. Também foi apresentada a metodologia utilizada para a análise da melhor mistura testada. No capítulo seguinte serão apresentados os resultados obtidos, bem como a discussão destes.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos dos ensaios realizados no solo natural (S), na cinza volante (CV) e nas misturas propostas para o estudo. Inicialmente, é apresentada a caracterização do solo coletado no município de Caucaia, bem como os resultados do ensaio de compactação e dos ensaios mecânicos (CBR, MR, RCS e RT). Em seguida, são apresentados os resultados da caracterização da cinza volante e os ensaios ambientais (Extratos Lixiviado e Solubilizado). Por fim, são apresentados os ensaios de compactação e discutidos os resultados encontrados dos ensaios mecânicos realizados nas misturas elaboradas para os tempos de cura analisados no trabalho (0, 7, 14 e 28 dias de cura).

4.2 Resultados dos Ensaios Realizados no Solo Natural de Caucaia

O solo natural de Caucaia também foi utilizado e caracterizado por BASTOS (2013) em sua dissertação de mestrado, porém todos os ensaios de caracterização foram refeitos para que fosse verificada a compatibilidade de resultados.

4.2.1 Densidade Real e Limites de Atterberg do Solo de Caucaia

Foi realizado o ensaio de determinação da densidade real do solo através do método de ensaio que utiliza o picnômetro com água e o resultado obtido foi o valor de 2,457 g/cm³ enquanto que o resultado obtido por BASTOS (2013) foi 2,560 g/cm³. Além disso, a amostra de solo desta mesma autora se comportou como sendo Não-Líquido (NL) e Não-Plástico (NP) enquanto que os resultados obtidos, neste trabalho, de LL e LP foram 15% e 12%, respectivamente. De posse desses resultados de LL e LP, calculou-se o valor de IP (IP = LL - LP) como sendo igual a 3%, o que classifica o solo como um material pouco plástico.

A incompatibilidade de valores obtidos entre o estudo de BASTOS (2013) e o da presente pesquisa pode dever-se ao fato de que a jazida foi utilizada na duplicação da CE-085. Sendo assim, chegou-se à conclusão de que o horizonte onde o solo foi coletado é diferente, o que implicou na necessidade de realização de todos os ensaios.

4.2.2 Granulometria do Solo de Caucaia

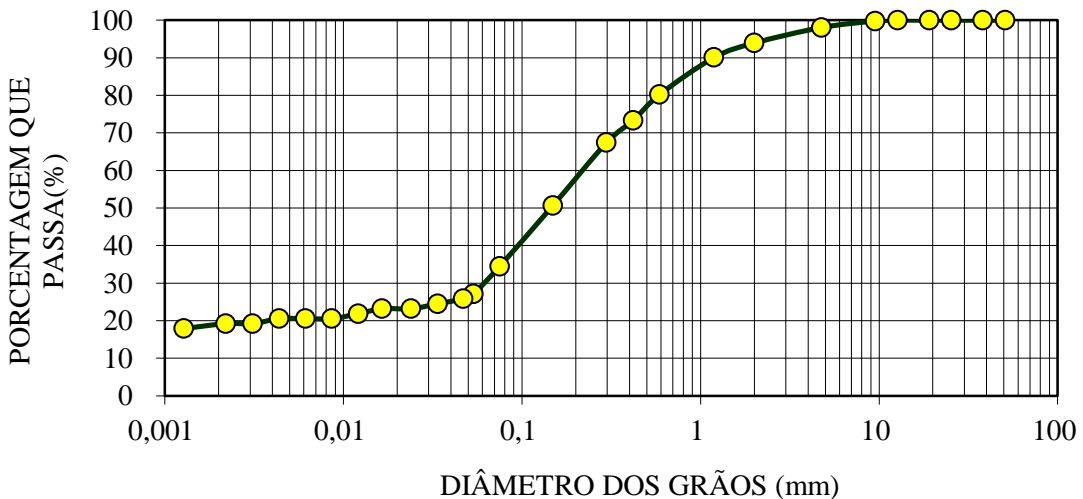
Os resultados em percentual encontrados na análise granulométrica do solo de Caucaia são apresentados na Tabela 10. A curva granulométrica do solo de Caucaia está apresentada na Figura 31. Pode-se verificar que esse solo apresenta uma granulometria contínua, possuindo grãos com várias dimensões. Pode-se observar que a quantidade de finos (#200) do material é de 34,5%, o que pode possibilitar uma maior interação com a cal.

Tabela 10 - Resultados em percentual da análise granulométrica do solo de Caucaia.

Material	Argila (%)	Silte (%)	Areia			Pedregulho (%)
			Fina (%)	Média (%)	Grossa (%)	
Solo	20,6	13,9	38,8	20,6	4,1	2,0

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 31 - Curva granulométrica do solo de Caucaia.



Fonte: Elaborada pela autora.

De posse da curva granulométrica e dos resultados dos Limites de Atterberg (LL, LP e IP), o solo de Caucaia foi classificado pelo sistema TRB (*Transportation Research Board*), atualmente chamado de sistema AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*), como sendo um solo do tipo A-2-4 (areia siltosa com previsão de comportamento de excelente a bom como subleito).

Na classificação TRB não fica claro como o solo pode ser definido entre uma areia siltosa ou uma areia argilosa, assim buscou-se um melhor detalhamento para a classificação no Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) que afirma que se o $IP < 4\%$, ele possui características exclusivamente siltosas, se $4\% \leq IP \leq 7\%$, o solo possui características intermediárias entre siltosas e argilosas e finalmente se o $IP > 7\%$, o solo

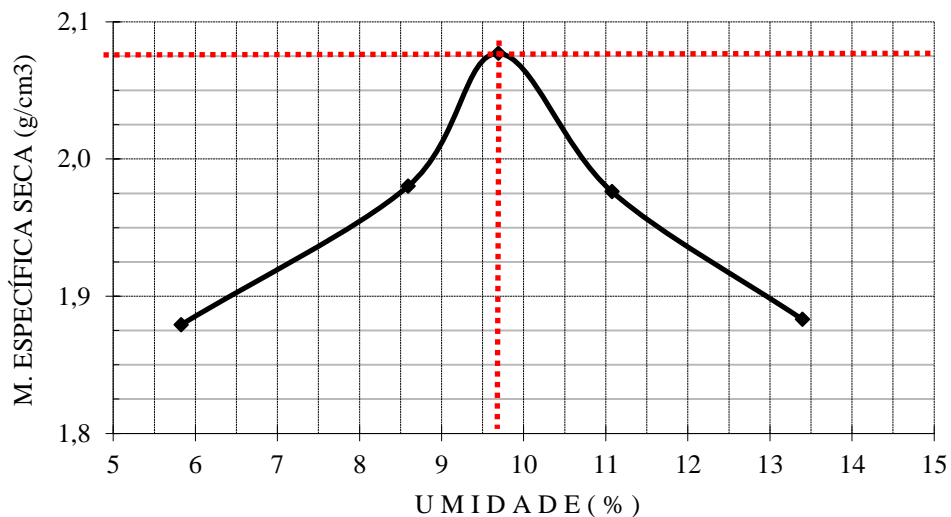
possui características exclusivamente argilosas, assim, por possuir um $IP = 3\%$, o solo de Caucaia é uma areia siltosa, embora a porcentagem de argila presente no solo seja maior do que a porcentagem de silte, como pode ser observado na Tabela 10 anterior.

Ressalta-se que, à luz dos resultados de LL e IP, 15% e 3%, respectivamente, o solo de Caucaia poderia ser aplicado, preliminarmente, em camadas granulares de pavimento, pois apresenta índices que atendem aos limites estabelecidos pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) que limita, no máximo, os valores do LL e do IP em 25% e 6%, respectivamente.

4.2.3 Curva de Compactação do Solo de Caucaia

A curva de compactação foi obtida através do ensaio que se utiliza de amostras trabalhadas conforme a Norma DNER-ME 162/94. A Figura 32 apresenta a curva de compactação do solo de Caucaia ensaiado para a energia intermediária (26 golpes), que fornece um valor de $2,075 \text{ g/cm}^3$ para a massa específica seca máxima e 9,7% para a umidade ótima.

Figura 32 - Resultados do ensaio de compactação para o Solo de Caucaia.



Fonte: Elaborada pela autora.

4.2.4 CBR do Solo de Caucaia

Para o ensaio de CBR, o solo de Caucaia, na energia intermediária, apresentou um valor de 4,3%, sendo esse valor considerado muito baixo. Quanto à expansão, o solo atendeu aos limites estabelecidos (máximo de 1% para sub-base) pelo DNIT, possuindo uma média de

expansão de 0,18%. Esse valor de CBR baixo pode ser explicado pela considerável porcentagem de finos presentes no solo. Assim, sugere-se que o solo seja submetido a uma estabilização, visando melhorar as suas propriedades tecnológicas, caso haja interesse de sua aplicação na área de pavimentação.

4.2.5 MR do Solo de Caucaia

O termo resiliência significa energia armazenada em um corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando se cessam as tensões causadoras das deformações. O Módulo de Resiliência é determinado a partir da deformação elástica medida, que é a relação entre a tensão desvio aplicada e a deformação específica axial resiliente ($MR = \sigma_d / \epsilon_r$).

Os resultados do ensaio de Módulo de Resiliência do solo foram tratados no programa Excel, importados para o programa LabFit e compilados no programa MatLab. Foi constatado que o modelo composto ($MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3}$) foi o que melhor representou o comportamento do MR do solo estudado, já que os modelos que variam o MR com a tensão desvio ($MR = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2}$) e com a tensão confinante ($MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2}$), separadamente, possuem um coeficiente de correlação (R^2) bem abaixo do valor 1. Assim, decidiu-se utilizar o modelo composto para todas as análises do ensaio de MR.

Além disso, o modelo composto é o que melhor tem representado o comportamento dos solos do Estado do Ceará segundo informado em Sousa Júnior (2005), Gondim (2008) e Araújo (2009). Na Tabela 11 estão dispostos os coeficientes dos modelos testados no solo de Caucaia.

Tabela 11 - Diferentes modelos de MR testados para o solo de Caucaia investigada.

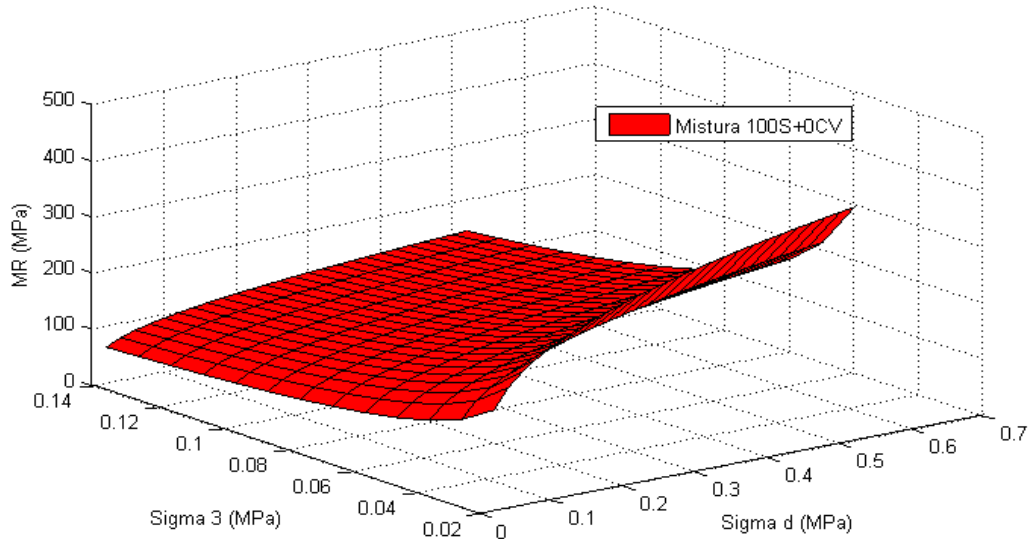
Material	Modelos de MR	Coeficientes			
		k1	k2	k3	Coeficientes de Correlação R^2
Solo Caucaia	$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2}$	55,757	-0,1880	-	0,1684
	$MR = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2}$	52,588	-0,2640	-	0,5015
	$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3}$	57,469	0,2586	-0,5480	0,9218

Fonte: Elaborada pela autora.

A Figura 33 mostra o comportamento do solo perante o carregamento do modelo composto testado. É possível perceber que o comportamento do solo diante do carregamento depende mais da tensão desviatória do que da tensão de confinamento. Isso deve ocorrer pela

parcela de argila (20,6%) presente na composição do solo, já que solos coesivos dependem mais da tensão desvio do que da tensão de confinamento.

Figura 33 - Comportamento do MR do solo de Caucaia usando o modelo composto.



Fonte: Elaborada pela autora.

4.2.6 RCS e RT do Solo de Caucaia

Quanto aos resultados dos ensaios de RCS e RT, verificou-se que os corpos de prova dos mesmos não resistiram à imersão de 24 horas antes do rompimento conforme orientam as Normas do DNER, ME-180/94 e ME-181/94, respectivamente. Os CPs constituídos do solo natural de Caucaia desintegraram em no máximo 2 horas após imersão. Na Figura 34 pode ser visualizado como os CPs estavam antes e como ficaram após imersão. Este comportamento já era esperado, tendo em vista o solo de Caucaia ter sido classificado como uma areia siltosa (A-2-4).

Figura 34 - Aspecto do solo de Caucaia antes e depois da imersão de 24 horas.



Fonte: Elaborada pela autora.

4.3 Resultados dos Ensaios Realizados na Cinza Volante (CV)

4.3.1 Densidade Real e Limites de Atterberg da Cinza Volante

A densidade real da cinza volante obtida também através do método do picnômetro, resultou em um valor de $2,317 \text{ g/cm}^3$ e os resultados dos limites de consistência mostraram que a cinza volante é um material NL e NP, apresentando, assim, um valor de $IP = 0$.

Lopes (2011) trabalhou com cinzas volantes de carvão mineral em sua pesquisa encontrando o valor de $2,105 \text{ g/cm}^3$ para a densidade real e também classificou o seu material como NL e NP. Os estudos da autora foram realizados em uma cinza proveniente do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda situado em Capivari de Baixo no Estado de Santa Catarina. Ubaldo (2005) também utilizou as mesmas cinzas que Lopes (2011) e obteve o valor de $2,090 \text{ g/cm}^3$ para a densidade real e classificou-as em materiais não-plásticos.

Quanto às diferenças de mais de $0,200 \text{ g/cm}^3$ encontradas entre as densidades em relação à densidade de $2,317 \text{ g/cm}^3$ é naturalmente comum, já que esse parâmetro depende do processo de queima e composição química de seus carvões e estes últimos pertencem a diferentes usinas.

As Figuras 35 e 36 mostram a segregação da amostra de cinza ao tentar realizar os ensaios de LL e LP, respectivamente.

Figura 35 - Segregação da cinza volante impossibilitando a realização do ensaio de LL.



Fonte: Própria autora.

Figura 36 - Segregação da cinza volante impossibilitando a realização do ensaio do LP.



Fonte: Própria autora.

4.3.2 Granulometria da Cinza Volante

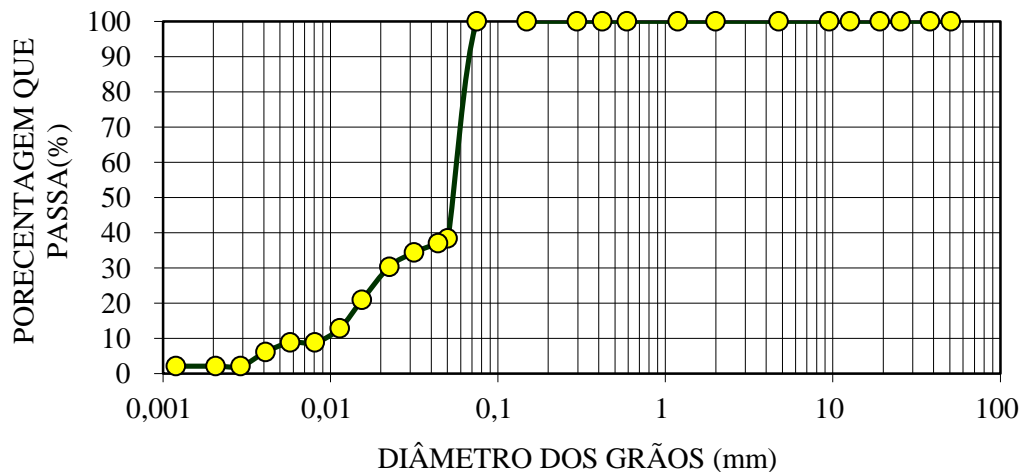
Os resultados em percentual encontrados na análise granulométrica da cinza volante são apresentados na Tabela 12. A curva granulométrica da cinza volante está apresentada na Figura 37. Pode-se verificar que a cinza volante apresenta uma granulometria com 100% passando na peneira #200 (0,075 mm), assim não foi realizada a etapa de peneiramento deste material.

Tabela 12 - Resultados em percentual da análise granulométrica da Cinza Volante.

Material	Argila (%)	Silte (%)	Areia			Pedregulho (%)
			Fina (%)	Média (%)	Grossa (%)	
Cinza Volante	6,7	93,3	0,0	0,0	0,0	0,0

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 37 - Resultados do ensaio de sedimentação para a Cinza Volante.



Fonte: Elaborada pela autora.

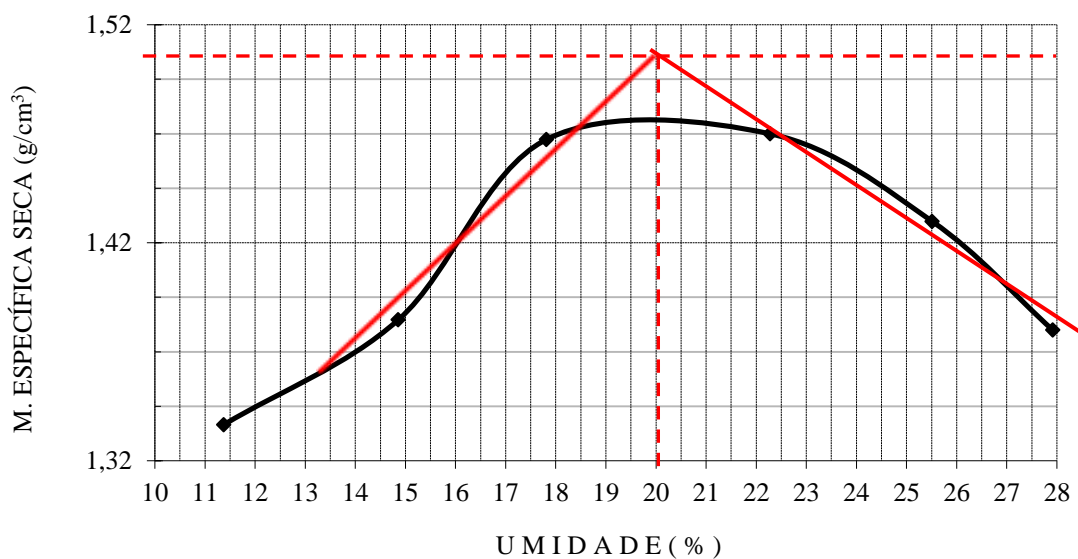
A granulometria da Figura 37 mostra ainda que 100% das partículas da cinza volante estão abaixo de 75 μm (0,075 mm), o que está de acordo com a definição geral de cinza volante que diz que as partículas devem estar compreendidas entre os diâmetros de 5 μm e 100 μm (0,005mm e 0,1mm). A grande quantidade de finos do material pode possibilitar uma maior interação com a cal. De forma similar, na granulometria da cinza volante utilizada por Lopes (2011), 95% das partículas apresentaram diâmetros menores do que 100 μm , o que também está de acordo com a definição.

Quanto à classificação pelo sistema AASHTO, a cinza é classificada como sendo equivalente a um solo do tipo A-4 (solo siltooso com previsão de comportamento sofrível a mau como subleito). Verificou-se que Lopes (2011) também obteve a mesma classificação.

4.3.3 Curva de Compactação da Cinza Volante

Assim como ocorreu com a compactação do solo de Caucaia, o ensaio de compactação da cinza utilizou-se de amostras trabalhadas conforme a norma DNER-ME 162/94. A curva de compactação da cinza pode ser visualizada na Figura 38, apresentando uma massa específica seca máxima de 1,508 g/cm³ e umidade ótima de 20% para a energia intermediária (26 golpes) de compactação, resultado este coerente por se tratar de um material de granulometria mais fina.

Figura 38 - Resultados do ensaio de compactação para a Cinza Volante.



Fonte: Elaborada pela autora.

Lopes (2011) obteve uma umidade ótima de 22,8%, bem próxima do valor encontrado para a cinza utilizada nesta pesquisa. Já a massa específica seca máxima obtida por Lopes (2011) foi de $1,925 \text{ g/cm}^3$, sendo bem maior. Esse resultado pode ser explicado pela parcela da cal existente na composição da cinza estudada na presente dissertação, pois esta é classificada como Classe C e, segundo a norma americana ASTM C 618-05, Cinzas de Classe C possuem em sua composição um certo teor de cal, diferente das cinzas Classe F, que não possuem parcela de cal em sua composição, o que é o caso da cinza utilizada por Lopes (2011).

4.3.4 CBR da Cinza Volante

Para o ensaio de CBR, a cinza volante apresentou uma resistência à penetração maior do que a resistência encontrada no solo. A cinza foi compactada na energia intermediária e apresentou um valor de 26,6%, sendo esse valor considerado recomendado ($\text{CBR} \geq 20\%$) para uma camada de sub-base de pavimento. Porém, quanto à expansão, o material foi considerado muito expansivo, apresentando uma média de 3,72% para três CPs ensaiados e não atendendo ao valor mínimo estipulado para camada de sub-base (expansão de no máximo 1%). Sugere-se que o solo seja submetido a uma estabilização, visando melhorar as suas propriedades quanto à expansão, caso haja interesse de sua aplicação na área de pavimentação em camadas mais nobres.

Segundo Dawson e Bullen (1991), ensaios de CBR realizados com cinzas pesadas geradas em usinas termelétricas britânicas, cuja granulometria é mais grossa em relação à cinza pesada brasileira, forneceram valores de CBR variando de 27% a 30%. No Brasil, muitos pesquisadores não utilizam o ensaio de CBR para avaliar o desempenho de seus materiais, assim não foi encontrado nenhum trabalho que contivesse resultados de CBR para cinzas volantes.

4.3.5 MR da Cinza Volante

Os resultados do Módulo de Resiliência da cinza volante também foram tratados no programa Excel, importados no programa LabFit e compilados no programa MatLab. Foi constatado que o modelo composto também foi o que melhor caracterizou o comportamento da cinza, assim como ocorreu com o solo. Na Tabela 13 estão dispostos os coeficientes dos

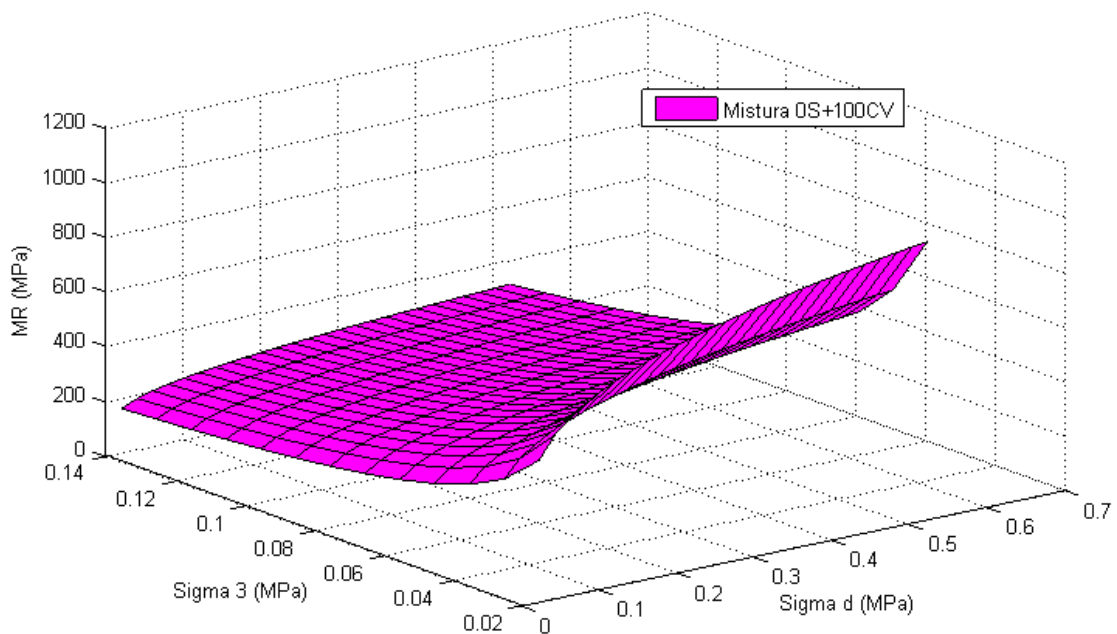
modelos testados na cinza volante e na Figura 39 apresenta um gráfico que mostra o comportamento do MR da cinza testada.

Tabela 13 - Diferentes modelos de MR testados para a cinza volante investigada.

Material	Modelos de MR	Coeficientes			
		k1	k2	k3	Coeficientes de Correlação R ²
Cinza Volante	$MR=k_1.\sigma_3^{k_2}$	220,90	0,0142	-	0,0229
	$MR=k_1.\sigma_d^{k_2}$	235,86	0,0341	-	0,0874
	$MR=k_1.\sigma_3^{k_2}.\sigma_d^{k_3}$	235,73	0,0249	-0,3075	0,9218

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 39 - Comportamento do MR da cinza volante estudada usando o modelo composto.



Fonte: Elaborada pela autora.

A Figura 39 mostra que o comportamento da cinza volante, para o modelo composto testado, assim como o comportamento do solo de Caucaia, depende mais da tensão desviatória do que da tensão de confinamento, o que está de acordo com o que a literatura aponta quando diz que o MR de solos coesivos dependem mais da tensão desvio do que da tensão confinante.

4.3.6 RCS e RT da Cinza Volante

Quanto aos resultados dos ensaios de RCS e RT, verificou-se, assim como o solo de Caucaia, que os CPs também não resistiram à imersão de 24 horas antes do rompimento

conforme norteiam as Normas do DNER, ME-180/94 e ME-181/94, respectivamente. Vale ressaltar que os CPs de cinza volante se desfizeram em menos de 30 minutos de imersão. A Figura 40 mostra os CPs de cinza volante antes e depois de serem imersos em água.

Figura 40 - CP de cinza volante antes e depois de ser imerso em água para os ensaios de RCS e RT.



Fonte: Elaborada pela autora.

4.3.7 Extrato Lixiviado e Extrato Solubilizado da Cinza Volante

A empresa majoritária do grupo Energia Pecém, a Eneva, na pessoa do Sr. Márcio M. Aguiar forneceu o Relatório de Caracterização do resíduo *fly ash* (cinza volante), bem como sua classificação quanto ao tipo de resíduo sólido (periculosidade). A amostra de cinza volante foi coletada no dia 24/02/2014 entrando no laboratório da Bioagri (empresa localizada no Estado de São Paulo no município de Piracicaba) em 28/02/2014. Esta empresa concluiu a análise no dia 25/03/2014.

O ensaio de Extrato Lixiviado, normatizado pela NBR 10.005/2004, não apresentou seus parâmetros inorgânicos e orgânicos acima dos limites estabelecidos. Porém o ensaio de Extrato Solubilizado, normatizado pela NBR 10.006/2004, apresentou 6 parâmetros inorgânicos, de um total de 21 parâmetros analisados, acima dos limites estabelecidos.

A Tabela 14 mostra esses 21 parâmetros e destaca aqueles 6 (alumínio, arsênio, cromo, fluoreto, selênio e sulfato) que ultrapassam os limites estabelecidos em norma. No Anexo deste trabalho consta o Relatório completo emitido pelo laboratório citado.

Tabela 14 - Resultados do ensaio de Extrato Solubilizado da Cinza Volante.

→Resíduo - Extrato Solubilizado (NBR 10006)

NBR 10006:2004 - Solubilizado - Parâmetros Inorgânicos				
Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP NBR 10004:2004
Alumínio	mg/L	0,01	1,8	0,2
Arsênio	mg/L	0,01	0,058	0,01
Bário	mg/L	0,01	0,262	0,7
Cádmio	mg/L	0,001	< 0,001	0,005
Chumbo	mg/L	0,01	< 0,01	0,01
Cianeto	mg/L	0,05	< 0,05	0,07
Cloreto	mg/L	5	28,7	250
Cobre	mg/L	0,005	< 0,005	2,0
Cromo	mg/L	0,01	0,075	0,05
Ferro	mg/L	0,01	0,043	0,3
Fluoreto	mg/L	0,1	7,8	1,5
Índice de Fenóis	mg/L	0,01	< 0,01	0,01
Manganês	mg/L	0,01	0,040	0,1
Mercúrio	mg/L	0,000075	< 0,00007	0,001
Nitrato (como N)	mg/L	1	< 1	10,0
Prata	mg/L	0,01	< 0,01	0,05
Selênio	mg/L	0,008	1,1	0,01
Sódio	mg/L	0,5	95,1	200
Sulfato	mg/L	50	552	250
Surfactantes (como LAS)	mg/L	0,1	0,15	0,5
Zinco	mg/L	0,01	< 0,01	5,0

Fonte: Elaborada pela autora retirado do Relatório dos ensaios ambientais da Cinza.

Pode-se perceber que o sulfato é o parâmetro presente na cinza volante em maior quantidade, 552 mg/L quando o limite é de 250 mg/L, resultando em 120,8% a mais da concentração limite. Já o selênio é o parâmetro existente na cinza com a maior concentração além do limite estabelecido, o componente possui um limite de 0,01 mg/L mas sua concentração na cinza foi de 1,1 mg/L, resultando em 10.900% a mais que o limite estabelecido. Lopes (2011) também só obteve elementos acima do volume máximo permitido apenas para os parâmetros inorgânicos de Extrato Solubilizado, sendo estes, alumínio, fluoretos e fenóis totais.

Além disso, alguns danos causados pelos elementos que estão acima do permitido podem ser citados. Segundo o sítio da Quimlab (2015), o alumínio é um elemento não essencial para plantas e animais, mesmo assim sua concentração no corpo humano é de 0,9 mg/kg. Concentrações acima de 1,5 mg/L são tóxicas e perigosas a vida marinha, o que ocorre neste caso, já que foi encontrada uma concentração de 1,8 mg/L na análise da Bioagri. Níveis abaixo de 0,2 mg/L para este elemento apresentam baixo risco.

Acima dos níveis máximos permitidos o alumínio e o sulfato podem causar no organismo humano, dormências nas pernas, grande oleosidade no couro cabeludo, além de queda de cabelos, osteoporose e característicos do mal de Alzheimer (QUIMLAB, 2015).

Quanto ao elemento arsênio, envenenamentos graves podem surgir a partir da ingestão de pequenas quantidades como 100 mg de trióxido de arsênico (composto do arsênio), efeitos crônicos podem resultar do acúmulo de compostos de arsênio no organismo em níveis baixos de consumo, ou seja, podem causar doenças como o câncer se ingeridas

mesmo em pequenas doses. A Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) recomenda nível máximo para águas de irrigação de 100 µg/L e a especificação para potabilidade é de 0,01 mg/L pela Portaria 518 do Ministério da Saúde (MS) (QUIMLAB, 2015).

O cromo é um elemento não essencial para as plantas, mas essencial aos animais em sua forma trivalente. Em sua forma hexavalente, o elemento tem se mostrado cancerígeno por inalação e é corrosivo para os tecidos. No abastecimento de água, o cromo pode existir em ambas as formas (trivalente e hexavalente), embora a forma trivalente raramente ocorra em água potável, assim os limites básicos são estabelecidos basicamente em função do cromo hexavalente. O padrão de potabilidade é fixado como valor máximo permissível de 0,05 mg/L pela Portaria 518 do MS (QUIMLAB, 2015).

Já o flúor é um elemento essencial aos animais e plantas, contudo em limites específicos. Ele é tão reativo que nunca é encontrado em sua forma elementar na natureza, sendo normalmente encontrado na sua forma combinada como fluoreto. Todos os alimentos possuem ao menos traços de fluoreto, os vegetais são os que possuem maiores concentrações devido à absorção da água e do solo e o uso da água fluoretada na preparação desses alimentos pode dobrar a quantidade de fluoreto presente, que acima de dosagens específicas provoca a fluorose dentária (doença que causa manchas nos dentes por excesso de flúor). A Organização Mundial de Saúde (OMS) considera 1,5 mg/L o valor máximo permissível que é o mesmo estabelecido no Brasil para água potável pela Portaria 518 do MS. Além da fluorose dentária, o fluoreto pode causar, no organismo humano, queda de cabelos crônica, varizes, hemorróidas, estrias, flacidez, celulite, dificuldade de cicatrização, catarata, dentre outros problemas de saúde (QUIMLAB, 2015).

Assim como o cromo, o elemento selênio é considerado não essencial às plantas, mas um nutriente essencial para a maioria dos animais, sendo conhecidas doenças por deficiência de selênio na medicina veterinária. Porém, acima dos níveis, o selênio ingerido é tóxico para animais e para seres humanos, podendo causar náuseas e vômitos, queda do cabelo e das unhas, erupção cutânea, lesões nervosas e fadiga. O padrão de potabilidade fixado pela Portaria 518 do MS é de 0,01 mg/L (QUIMLAB, 2015).

Assim, em função dos resultados obtidos, a amostra de cinza deve ser classificada como Classe II A - Resíduo Não Inerte. Lopes (2011) obteve a mesma classificação para a sua cinza volante.

Segundo Lopes (2011), o fato da classificação da cinza volante ter se enquadrado como Classe II A – Resíduo Não Inerte, não a desclassifica como agente cimentante em

misturas com solo, já que, considerando o ensaio de Extrato Lixiviado, que representa a infiltração das águas das chuvas no solo, todos os parâmetros analisados encontraram-se dentro dos limites permitidos. Entretanto, estudos mais aprofundados devem ser realizados, afim de que se possa investigar se os parâmetros que resultaram acima dos limites estabelecidos causam danos ao meio ambiente.

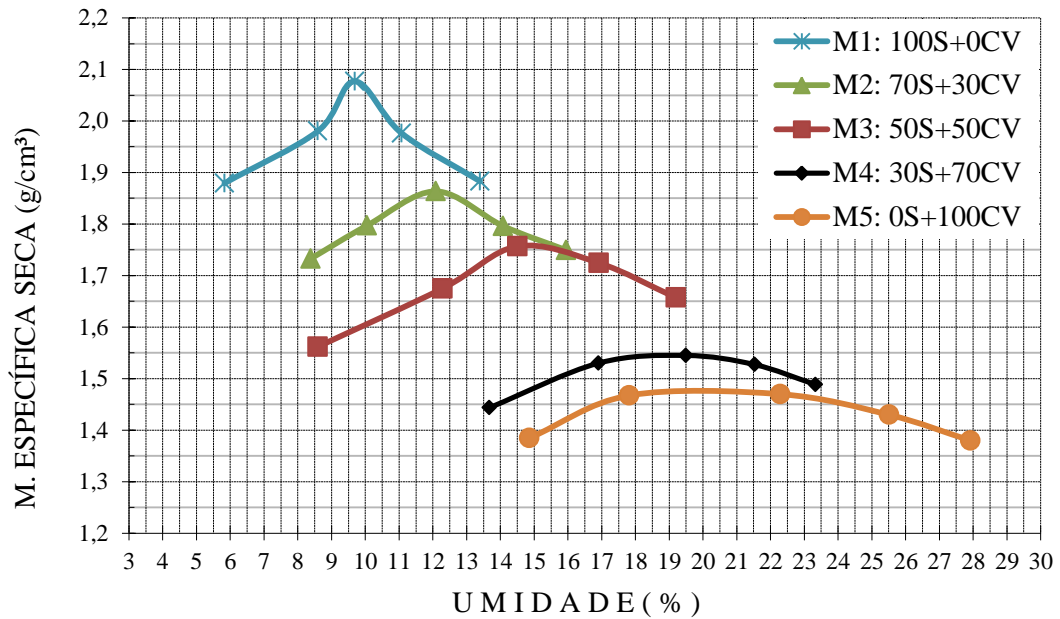
É importante ressaltar que o solo quando aplicado na área de pavimentação está no estado compactado o que pode dificultar o transporte dos elementos que causam a poluição dos mananciais. Sendo assim, é recomendável que normas ambientais específicas sejam desenvolvidas considerando-se a estrutura real de um pavimento. Outro fator a ser considerado é que o emprego de um agente cimentante, como a cal por exemplo, pode favorecer o encapsulamento dos elementos indesejáveis.

4.4 Resultados dos Ensaios Realizados nas Misturas Solo+Cinza

4.4.1 Compactação das Misturas Solo+Cinza

Inicialmente foram realizados todos os ensaios de compactação (na energia intermediária) nas misturas idealizadas. A Figura 41 mostra as curvas de compactação das misturas (M1, M2, M3, M4 e M5) apresentadas na Tabela 8 do capítulo anterior. Lembrando que dentre essas misturas, foram escolhidas duas misturas que obtiveram desempenhos satisfatórios quanto aos ensaios mecânicos para que se pudesse utilizá-las analisando o efeito da cura e do agente aglomerante (cal). Na Tabela 15, estão resumidos os resultados da compactação encontrados para cada mistura.

Figura 41 - Curvas de compactação das misturas Solo+Cinza.



Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 15 - Resumo dos resultados das compactações das misturas Solo+Cinza.

Misturas	Umidade ótima (%)	Massa Específica (g/cm ³)
M1: 100S+0CV	9,7	2,075
M2: 70S+30CV	12,1	1,863
M3: 50S+50CV	14,8	1,854
M4: 30S+70CV	19,0	1,547
M5: 0S+100CV	20,0	1,508

Fonte: Elaborada pela autora.

Analisando-se a Figura 41, é possível verificar que houve acréscimo da umidade ótima e diminuição da massa específica seca máxima das misturas em função do aumento do teor de cinza na mistura. Isso se deve ao fato da densidade real da cinza (2,317 g/cm³) ser menor do que a densidade do solo (2,457 g/cm³).

A Tabela 16 mostra os resultados encontrados por Lopes (2011) para suas misturas. Observa-se também que quanto maior o teor de cinza na mistura, seja a cinza leve ou a pesada (cinza de fundo), maior é a umidade ótima e menor o valor da massa específica seca máxima de cada mistura. Os números após as siglas indicam a porcentagem do material na mistura.

Tabela 16 - Resumo dos resultados das compactações das misturas de Lopes (2011).

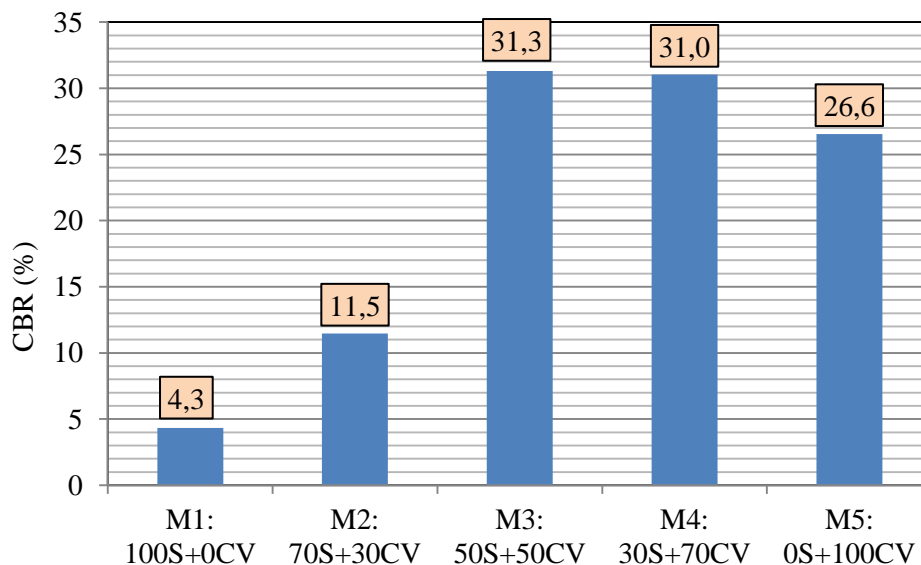
Material/Mistura	Umidade Ótima (%)	Massa Específ. Seca Máx. (g/cm ³)
Solo (S)	9,7	2,065
Cinza de Fundo (CF)	38,0	1,846
Cinza Volante (CV)	22,8	1,925
S70/CF27/Cal3	16,8	1,598
S60/CF37/Cal3	17,8	1,449
S90/CV7/Cal3	11,1	1,941
S80/CV17/Cal3	12,9	1,835

Fonte: Elaborada pela autora com base na pesquisa de Lopes (2011).

4.4.2 CBR das Misturas Solo+Cinza

Na Figura 42 é possível visualizar os resultados dos valores dos CBR's das Misturas Solo + Cinza (volante) sem utilização do efeito de cura, mas com a imersão de 96 horas antes do rompimento. As misturas M3, M4 e M5 apresentaram resistências à penetração semelhantes entre si, se comparadas às outras duas misturas. Tais misturas apresentaram valores maiores do que 20%, valor este considerado pelos órgãos rodoviários, o mínimo adequado para uso em camada de sub-base de pavimento.

Figura 42 - Comparação dos CBR's (sem cura e com imersão de 96 horas) obtidos das Misturas Solo+Cinza em diferentes teores.



Fonte: Elaborada pela autora.

Já quanto à expansão essas três misturas (M3, M4 e M5) não atenderam ao limite exigido que é no máximo de 1% para emprego em sub-base, estando assim, não aptas para

serem usadas em camadas mais nobres (base e sub-base) dos pavimentos. As expansões de todas as misturas estão apresentadas na Tabela 17. Pode-se também observar que a mistura M2 pode ser empregada para compor uma camada de reforço do subleito. Esse fato faz com que haja a possibilidade de reutilizar pelo menos 30% da cinza para ser empregada em obras de pavimentação. Ressalte-se também que as misturas M3, M4 e M5 poderiam também ser usadas em camadas de reforço, desde que não haja nenhum tipo de comprometimento ambiental.

Tabela 17 - Resumo dos resultados das expansões das misturas Solo+Cinza.

Mistura	Expansão (%)
M1	0,18
M2	0,93
M3	1,98
M4	2,89
M5	4,07

Fonte: Elaborada pela autora.

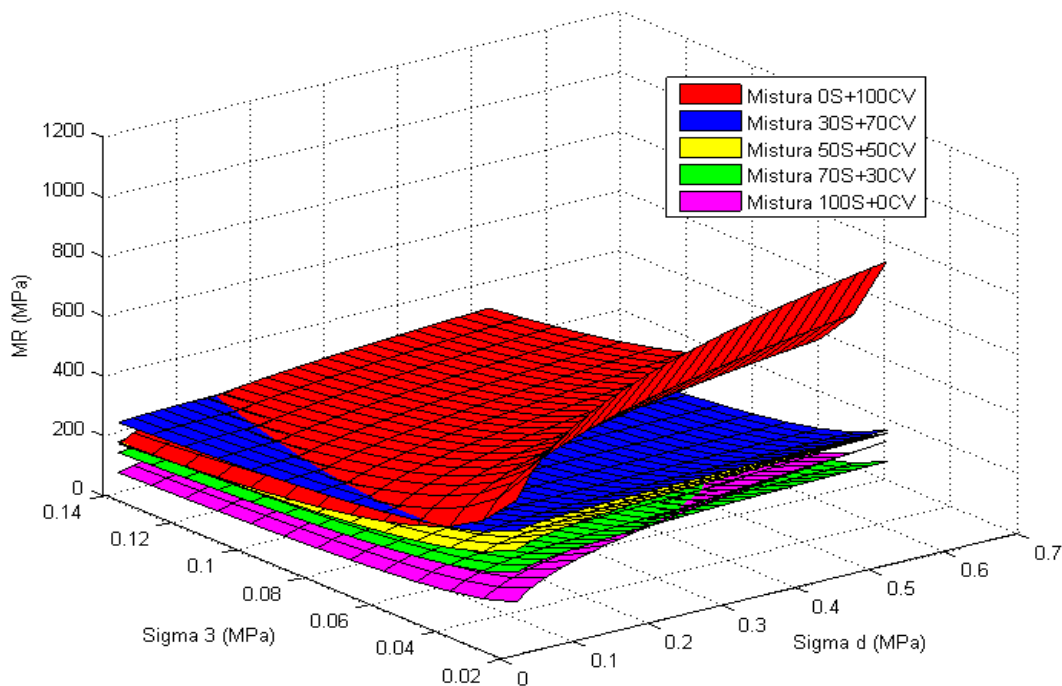
Esses valores maiores que 1% de expansão, caso das misturas M3, M4 e M5, caracterizam materiais muito expansivos e essa propriedade é facilmente explicada pela grande concentração de cinza (50%, 70%, 100%, respectivamente) na composição dessas misturas. Assim, quanto maior o teor de cinza, maior a tendência de aumentar a expansão, pelo fato da mistura absorver mais água. Percebe-se, assim, que há necessidade de se investigar o emprego de um material (por exemplo, a cal) para tentar melhor estabilizar tais misturas.

4.4.3 MR das Misturas Solo+Cinza

O comparativo dos comportamentos das Misturas Solo+Cinza com relação ao ensaio de Módulo de Resiliência está disposto na Figura 43. Para todas as misturas foi utilizado o modelo composto para analisar o comportamento do MR. E na Tabela 18 estão dispostos os coeficientes (k_1 , k_2 e k_3) do modelo composto para a determinação da equação de MR das misturas Solo+Cinza, bem como os valores dos coeficientes de correlação (R^2) que deram todos acima de 0,9. Esse último resultado mostra que os dados são bem ajustados pelo modelo composto empregado.

É possível observar através do gráfico que o MR do solo é o menor, ou seja, menor é a sua capacidade de se recuperar diante de um determinado carregamento. Também, é possível observar que o módulo vai aumentando conforme se aumenta o teor de cinza nas misturas, até alcançar a composição 100% de cinza (M5). A mistura M5 é a que apresenta o maior módulo resiliente, embora apresente a superfície menos estável dentre as misturas testadas. Além disso, a Figura 43 também mostra que o comportamento das misturas, assim como o comportamento do solo de Caucaia e da cinza volante, depende mais da tensão desviatória do que da tensão de confinamento, comportamento já esperado, uma vez que os materiais envolvidos nas misturas possuem natureza coesiva.

Figura 43 - Comparação dos MR's imediatos (sem cura) obtidos das misturas Solo+Cinza.



Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 18 - Coeficientes do modelo composto para MR aplicado às misturas Solo+Cinza.

Misturas	Módulo de Resiliência - Modelo Composto			
	k1	k2	k3	Coefficiente de Correlação R ²
M1	57,4686	0,2586	-0,5480	0,9218
M2	77,1707	0,0693	-0,3957	0,9409
M3	108,1712	0,0701	-0,4001	0,9055
M4	186,7554	0,2067	-0,6104	0,9358
M5	235,7273	0,0249	-0,3075	0,9316

Fonte: Elaborada pela autora.

4.4.4 RCS e RT das Misturas Solo+Cinza

Quanto aos resultados dos ensaios de RCS e RT, verificou-se, assim como o solo de Caucaia (M1) e a cinza (M5), que os CPs das misturas M2, M3 e M4 também não resistiram à imersão de 24 horas antes do rompimento conforme orientam as normas. Vale ressaltar que os CPs moldados não foram submetidos à cura, tendo sido colocados imediatamente após a compactação, imersos em água. Deste modo, não foi possível proceder com o rompimento dos CPs.

A ocorrência dos desmanches deveu-se ao fato das misturas não conterem um material que promova coesão. Nessa condição, sugere-se que todas as misturas sejam submetidas a uma estabilização química, visando melhorar as suas propriedades e assim possam ser submetidas aos ensaios de RSC e RT.

4.4.5 Escolha das Melhores Misturas Solo+Cinza

Diante dos resultados explanados, foi possível eleger duas misturas que foram submetidas à adição de um teor fixo de 5% de cal (baseado na literatura), além da verificação do comportamento dessas misturas sob o efeito de cura nos tempos de 0, 7, 14 e 28 dias.

As misturas eleitas foram M3 e M5 por apresentarem altos teores de cinza e CBR's relativamente próximos, 31,3% e 26,6%, respectivamente, apesar de terem apresentado expansões acima do limite recomendado pelas normas vigentes ($> 1\%$), 1,98% e 4,07%, respectivamente. A expansão será uma propriedade a ser avaliada, pois permitirá a verificação da redução ou não da variação de volume diante da adição de cal e dos tempos de cura. Resumidamente, essas duas misturas também foram selecionadas em função de terem apresentado o maior valor de CBR (M3) e o maior teor de cinza (M5).

O Módulo de Resiliência das misturas M3 e M5 apresentaram-se diferentes entre si, o da M3 possui o comportamento mais estável dentre as cinco misturas enquanto que o da M5 é o menos estável, porém de valor maior do que M3. Por apresentarem comportamentos diferentes, é encorajador e curioso observar o que poderá acontecer a essas misturas após o acréscimo da cal durante os tempos de cura investigados.

Por fim, são indiferentes os resultados obtidos de RCS e RT, já que todas as cinco misturas não resistiram à imersão de 24 horas em água antes do rompimento para os dois ensaios. Uma indicação positiva, do processo de estabilização química, seria o simples fato

dos CPs moldados para esses dois ensaios resistirem à imersão e serem levados à prensa para posterior rompimento.

4.5 Resultados dos Ensaios Realizados nas Misturas Solo+Cinza+Cal

Como mencionado no item anterior, as misturas escolhidas foram: M3 e M5. Todos os ensaios realizados com as misturas solo+cinza foram reproduzidos para essas duas misturas com a diferença do efeito de cura e a adição de um teor fixo de 5% da cal.

Assim, como M3 é uma composição de 50% de cada material, solo+cinza, e M5 é uma composição de 100% cinza, convencionou-se que a mistura estabilizada quimicamente M3 passou a ser denominada M3Cal e M5 passou a ser denominada M5Cal. Com o acréscimo da cal na composição das duas misturas, a composição de M3Cal passou a ser 47,5% de solo+47,5% de cinza+5% de cal e M5Cal passou a ser 95% de cinza+5% de cal. A Tabela 19 apresenta a nova nomenclatura e o teor de cada componente na mistura.

Tabela 19 - Resumo da nova nomenclatura e composição das duas misturas com cal.

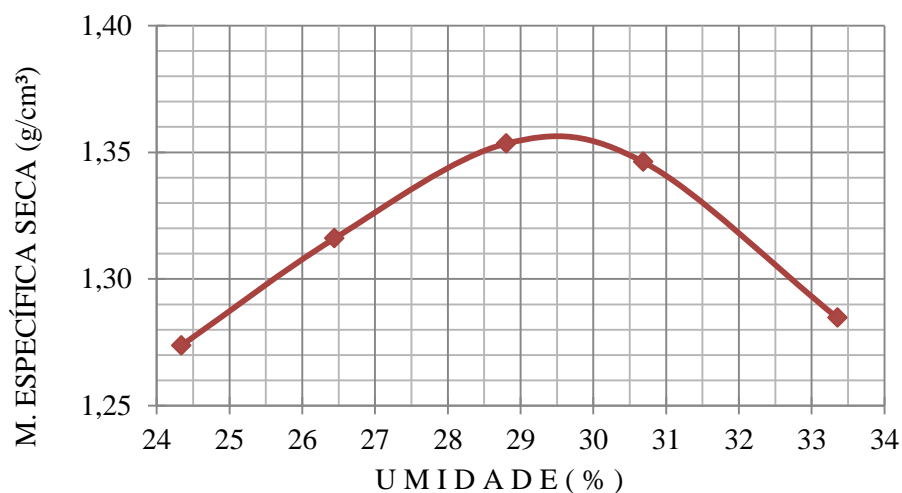
Mistura	Composição	Nova nomenclatura	Nova composição
M3	50% solo+50% cinza	M3Cal	47,5% solo+47,5% cinza+5% cal
M5	0% solo+100% cinza	M5Cal	95% cinza+5% cal

Fonte: Elaborada pela autora.

4.5.1 Compactação das Misturas Solo+Cinza+Cal

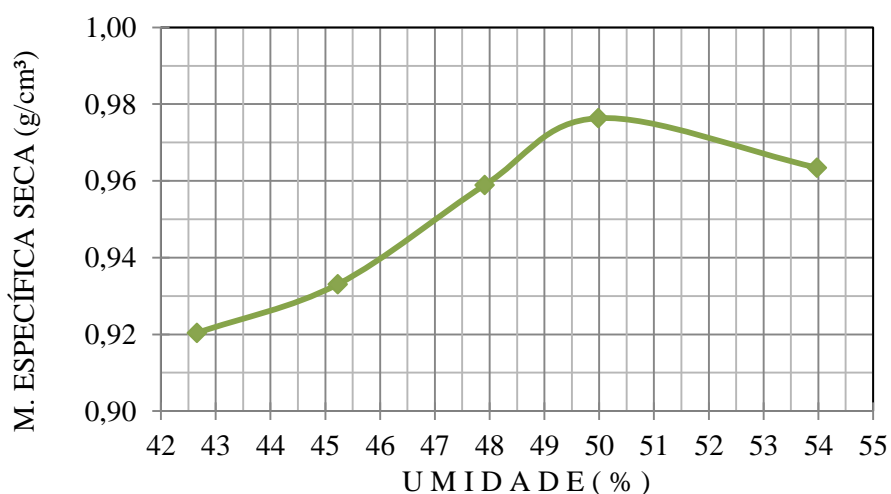
Assim como ocorreu com todas as misturas propostas neste trabalho, a compactação das misturas solo+cinza+cal também se utilizou de amostras trabalhadas conforme a Norma DNER-ME 162/94. A curva de compactação das misturas M3Cal e M5Cal estão apresentadas na Figura 44 e 45.

Figura 44 - Curva de compactação da Mistura M3Cal.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 45 - Curva de compactação da Mistura M5Cal.



Fonte: Elaborada pela autora.

Através dos gráficos das Figuras 44 e 45 é possível verificar os valores da umidade ótima e massa específica seca máxima de cada mistura. Na Tabela 20 são apresentados esses valores para uma compactação realizada na energia intermediária (26 golpes), bem como os resultados para o caso das misturas M3 e M5 para que os valores possam ser comparados.

Tabela 20 - Resumo dos resultados das compactações das misturas estabilizadas granulometricamente e quimicamente.

Misturas	Umidade ótima (%)	Massa Específica (g/cm ³)
M3	14,8	1,854
M3Cal	29,5	1,355
M5	20,0	1,508
M5Cal	50,0	0,977

Fonte: Elaborada pela autora.

Identifica-se um aumento da umidade ótima e um decréscimo da massa específica seca máxima das misturas M3Cal e M5Cal em relação às misturas M3 e M5, respectivamente. Isso ocorre devido o acréscimo da cal na composição das novas misturas. A cal absorve mais água e possui massa específica seca máxima menor, explicando assim, as umidades ótimas maiores e massas específicas secas máximas menores das novas misturas.

4.5.2 CBR das Misturas Solo+Cinza+Cal

De posse dos resultados das compactações das novas misturas, prosseguiu-se com os ensaios mecânicos que avaliaram as resistências das mesmas. Na Tabela 21 estão apresentados os valores encontrados dos CBR's das novas misturas no decorrer dos tempos de cura analisados.

Tabela 21 - Resumo dos resultados dos CBR's das misturas Solo+Cinza+Cal sob efeito de cura.

Misturas	CBR (%)			
	0 dias	7 dias	14 dias	28 dias
M3	31,3	-	-	-
M3Cal	36,5	68,1	158,3	169,9
M5	26,6	-	-	-
M5Cal	37,0	110,2	187,4	218,4

Fonte: Elaborada pela autora.

Foi possível constatar o ganho de resistências nas misturas pelo simples fato de se adicionar cal as mesmas. O mesmo ocorreu com Farias (2005), que ao adicionar cal nas misturas solo+cinza pesada obteve maiores valores de CBR's para suas misturas, conforme pode ser visualizado na Tabela 22. Os números após as siglas significam a porcentagem do material.

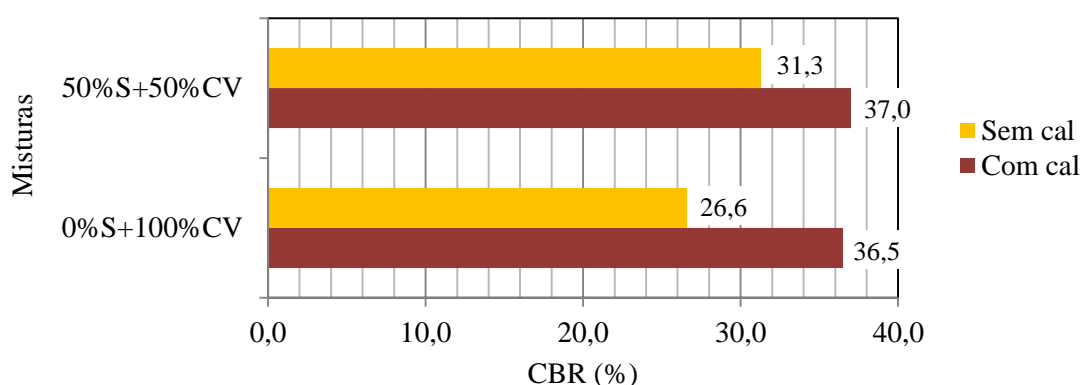
Tabela 22 - Resumo dos resultados dos CBR's das misturas investigadas por Farias (2005).

Material/Mistura	Teor de Cal (%)	CBR (%)
Solo (S)	0	10,6
	4	44,9
S70/CP30	0	19,2
	4	42,8
S50/CP50	0	22,6
	3	35,7
S30/CP70	0	18,8
	6	28,1
Cinza Pesada (CP)	0	5,0
	5	24,6

Fonte: Pesquisa de Farias (2005).

Na Figura 46 é possível visualizar a comparação dos resultados dos valores de CBR das Misturas Solo+Cinza e Solo+Cinza+Cal de efeito imediato (0 dias de cura).

Figura 46 - Comparação dos valores de CBR das misturas Solo+Cinza e Solo+Cinza+Cal sob efeito de cura imediata e imersão de 96 horas.

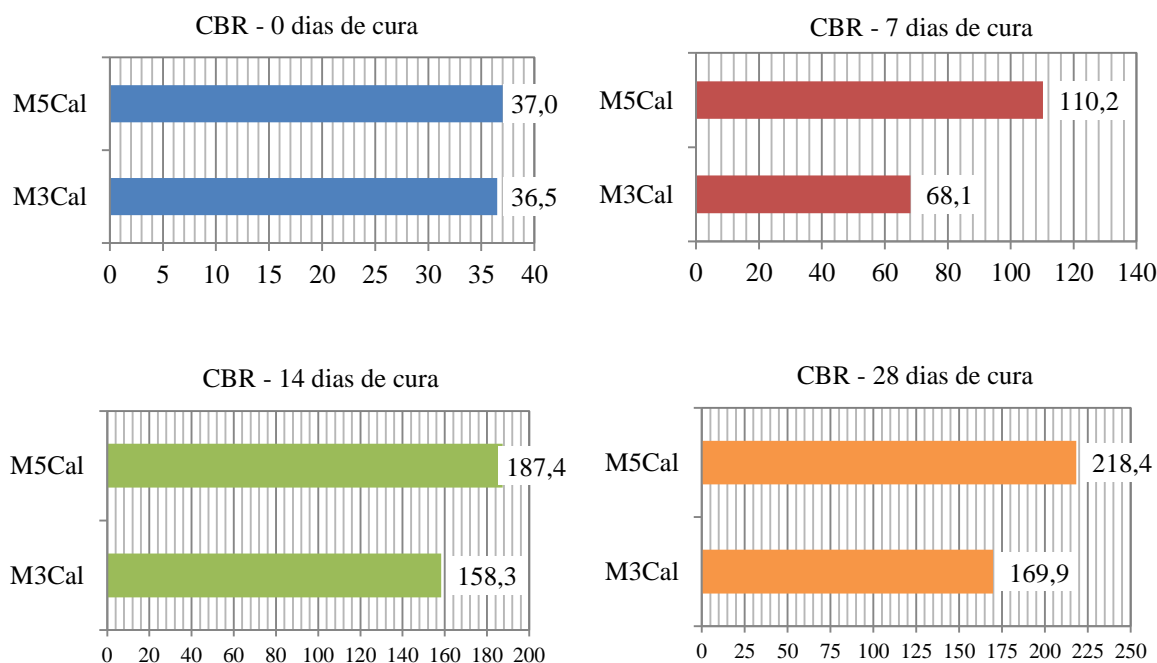


Fonte: Elaborada pela autora.

Esse ganho de resistência em ambas as misturas já era esperado pelo conhecimento do comportamento cimentante da cal. Porém, observa-se que a mistura M5 tinha inicialmente um valor de CBR menor do que a mistura M3. Ao ser adicionada cal em ambas as composições foi constatado um valor de CBR maior para a mistura M5Cal do que o CBR da mistura M3Cal. Isso deve-se a maior interação da cal com a cinza, já que a mistura M5 era composta de 100% de cinza, enquanto que a mistura M3 possuía em sua composição 50% de cinza. Na Figura 47 é possível comparar as misturas M5Cal e M3Cal em cada tempo

de cura.

Figura 47 - Comparação dos valores de CBR das misturas M3Cal e M5Cal sob efeito dos tempos de cura.



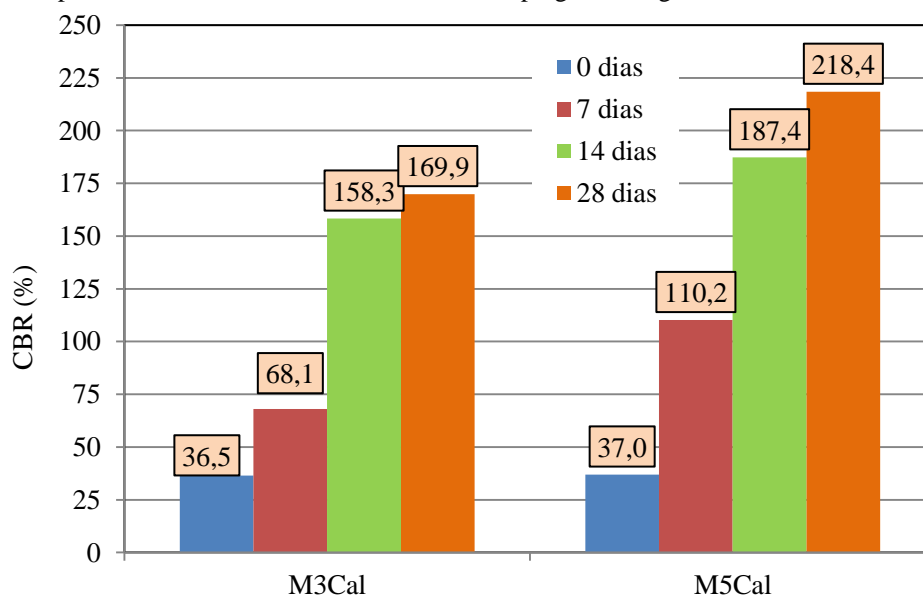
Fonte: Elaborada pela autora.

Percebe-se que os valores de CBR da mistura M5Cal são sempre maiores que os CBR's da mistura M3Cal no decorrer dos tempos de cura analisados: 0, 7, 14 e 28 dias. Volta-se a destacar que esse ganho de resistência ao longo do tempo deve-se ao fato de ocorrer uma maior interação da cal com a cinza existente na composição da mistura, o mesmo ocorreu com os valores de CBR da pesquisa de Dias (2004) que encontrou CBRs com valores acima de 100% para misturas com 9%, 12% e 25% de cal, sendo o restante da composição, cinza volante.

O ganho de resistência da mistura M5Cal no tempo de cura de 28 dias supera 490% de resistência em relação a mesma mistura ao tempo de cura de 0 dias. Já para a mistura M3Cal o ganho de resistência em 28 dias supera os 365% de resistência em relação a mesma mistura com 0 dias de cura.

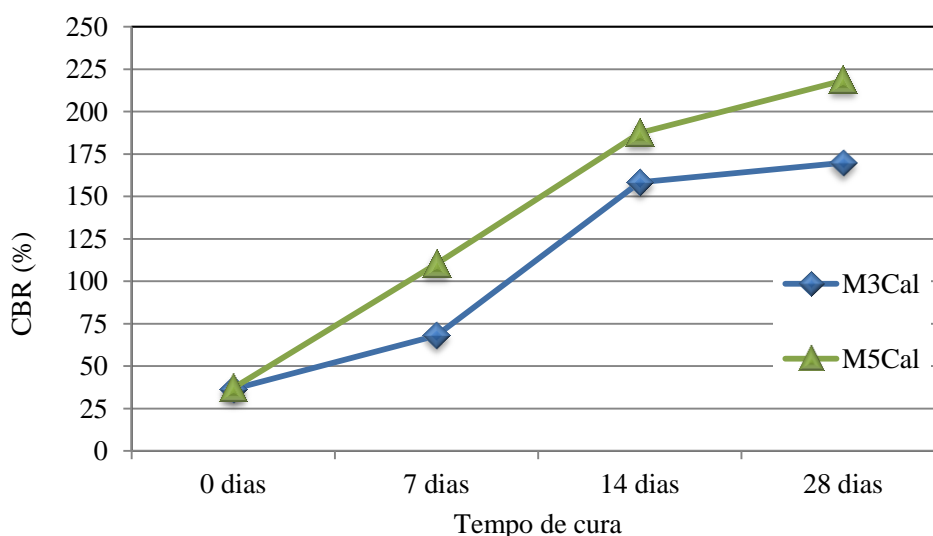
Nas Figuras 48 e 49 é possível visualizar o ganho de resistência à penetração (CBR) das misturas M5Cal e M3Cal de forma isolada e em conjunto, respectivamente.

Figura 48 - Variação dos valores de CBR das misturas M3Cal e M5Cal sob efeito dos tempos de cura analisados de forma isolada empregando-se gráfico de barras.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 49 - Comparação dos valores dos CBR's das misturas M5Cal e M3Cal sob efeito dos tempos de cura de forma conjunta empregando-se gráfico de linhas.



Fonte: Elaborada pela autora.

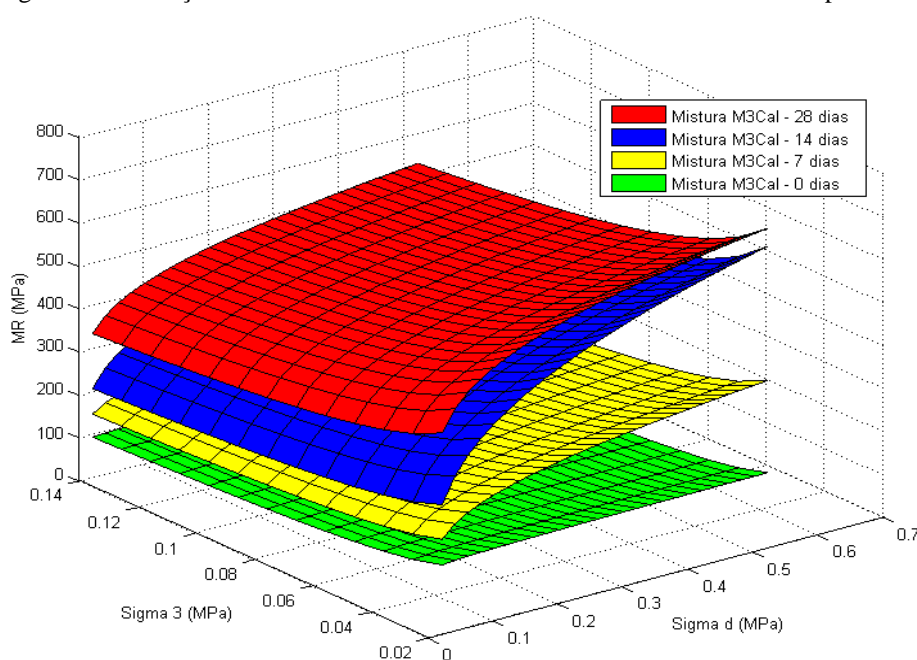
Quanto à expansão as duas misturas atenderam ao limite exigido que é no máximo 1%, uma vez que as 2 misturas apresentaram expansão zero (valor) para todos os tempos de cura, significando que não há variação de volume diante dos tempos de cura analisados. Dessa forma, considerando apenas o ensaio de CBR, pode-se afirmar que as duas misturas M5Cal e M3Cal podem ser utilizadas em camadas de bases de pavimentos, já que o limite mínimo exigido de aplicação para essa camada é de um CBR de 60% (em alguns casos 40% ou 80%, a

dependem do tráfego) e expansão máxima de 0,5%. A partir dos 7 dias de cura, as duas misturas já possuíam seus CBR's acima do valor mínimo requerido e expansão dentro dos valores estabelecidos pelo DNIT.

4.5.3 MR das Misturas Solo+Cinza+Cal

O comparativo dos comportamentos das Misturas Solo+Cinza+Cal perante os carregamentos do ensaio de Módulo de Resiliência estão dispostos nas Figuras 50 e 51. Na Figura 50 é possível visualizar o comportamento da mistura M3Cal sob o efeito dos tempos de cura e que seu MR aumenta à medida que o tempo passa, ou seja, o efeito da cura é positivo para esta mistura. Além disso, pode-se perceber que a adição da cal continua a fazer o comportamento da mistura depender mais da tensão desviatória do que da tensão de confinamento.

Figura 50 - Variação dos valores de MR da mistura M3Cal sob efeito dos tempos de cura.

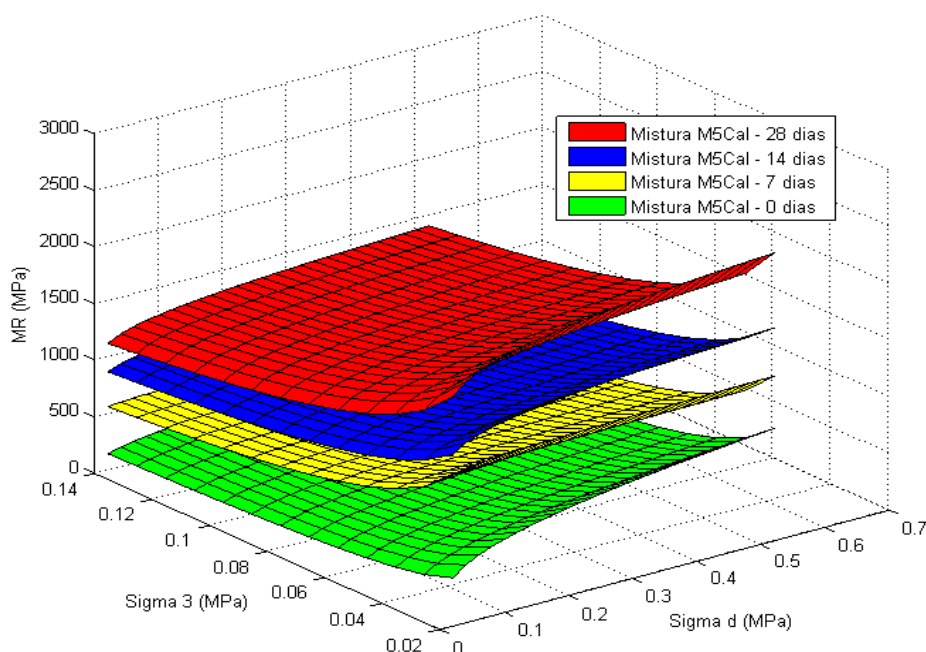


Fonte: Elaborada pela autora.

Na Figura 51 visualiza-se o comportamento da mistura M5Cal sob o efeito dos tempos de cura que, semelhante à mistura M3Cal, também possui acréscimo de MR com o passar do tempo. O efeito da cura também é positivo para esta mistura. Além disso, a mistura M5Cal também é mais dependente da tensão desviatória. As superfícies dos quatro tempos de

cura analisados para esta mistura são bem semelhantes, embora possua o acréscimo, já citado, do MR.

Figura 51 - Variação dos valores de MR da mistura M5Cal sob efeito dos tempos de cura.



Fonte: Elaborada pela autora.

Na Tabela 23 estão dispostos os coeficientes do modelo composto testado para as misturas Solo+Cinza+Cal. Pode-se perceber que todas as misturas foram bem ajustadas por este modelo, uma vez que os valores dos coeficientes de correlação deram superiores a 0,9.

Tabela 23 - Coeficientes do modelo composto para cálculo do MR das misturas Solo+Cinza+Cal.

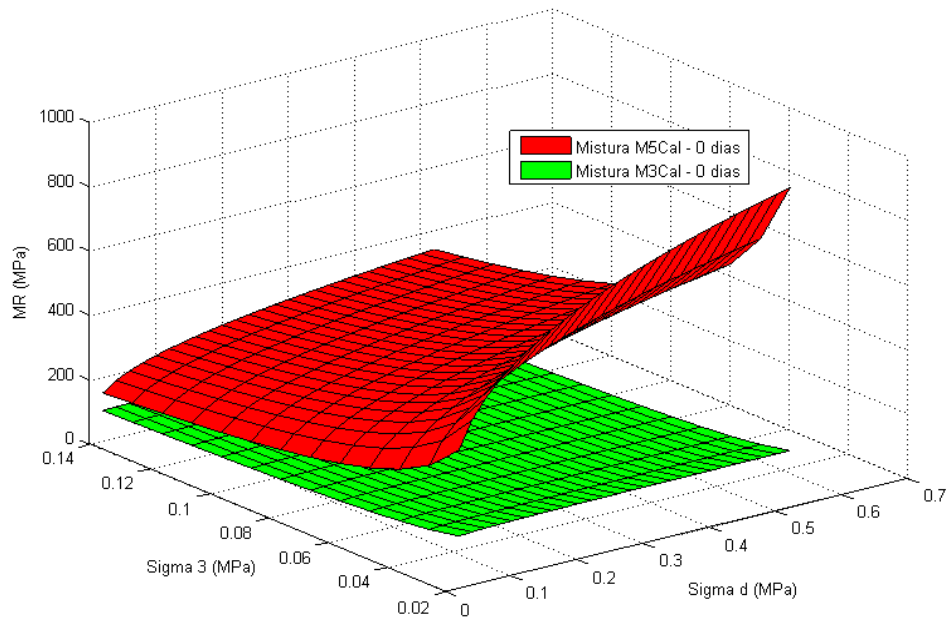
Misturas	Tempos de cura (dias)	Módulo de Resiliência - Modelo Composto			
		k ₁	k ₂	k ₃	Coefficiente de Correlação R ²
M3Cal	0	111,7273	0,0250	-0,2876	0,9411
	7	188,5383	0,1739	-0,2143	0,9369
	14	382,4976	0,2592	-0,1982	0,9393
	28	409,6096	0,1417	-0,1759	0,9407
M5Cal	0	237,4686	0,2586	-0,5480	0,9217
	7	357,7273	0,0250	-0,4461	0,9344
	14	641,5912	0,0657	-0,2854	0,9382
	28	805,8475	0,0693	-0,3048	0,9419

Fonte: Elaborada pela autora.

As Figuras 52, 53, 54 e 55 detalham o comportamento das duas misturas, M3Cal e M5Cal, para os tempos de cura de 0, 7, 14 e 28 dias, respectivamente. Para todos os tempos

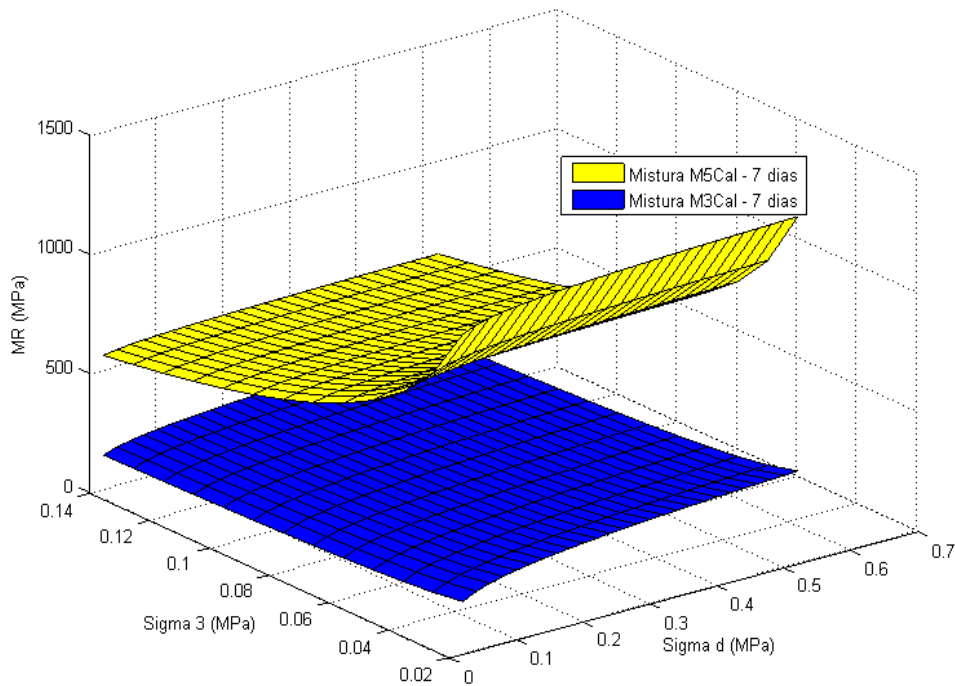
de cura analisados, a mistura M5Cal possui valores de MR maiores do que os da mistura M3Cal, embora as superfícies da mistura M5Cal apresentem maiores instabilidades. Além disso, pode-se perceber que o efeito da cura sobre as misturas faz o comportamento das misturas depender mais da tensão desviatória do que da tensão de confinamento.

Figura 52 - Comparação dos valores de MR das misturas M3Cal e M5Cal para 0 dias de cura.



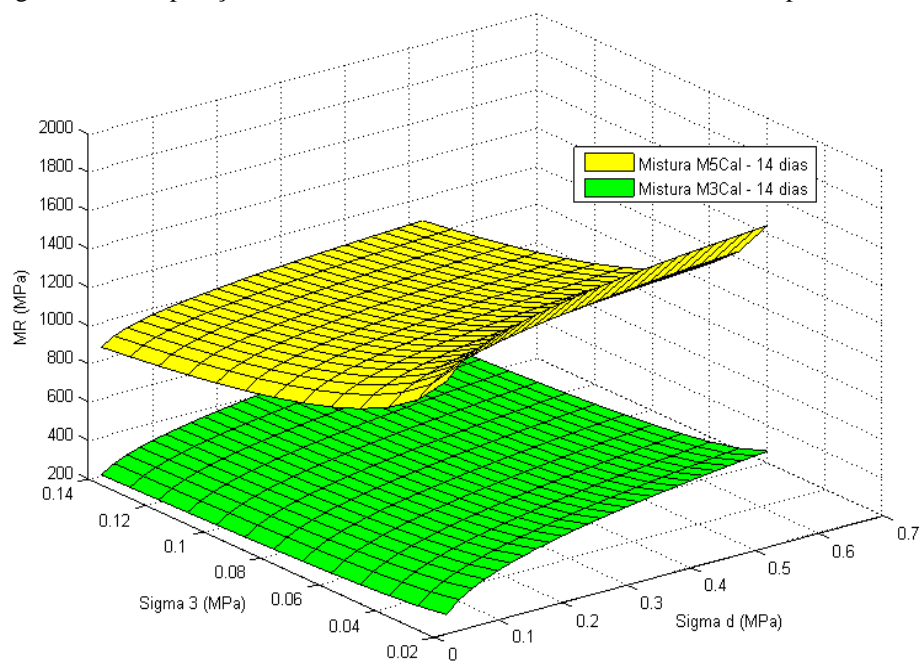
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 53 - Comparação dos valores de MR das misturas M3Cal e M5Cal para 7 dias de cura.



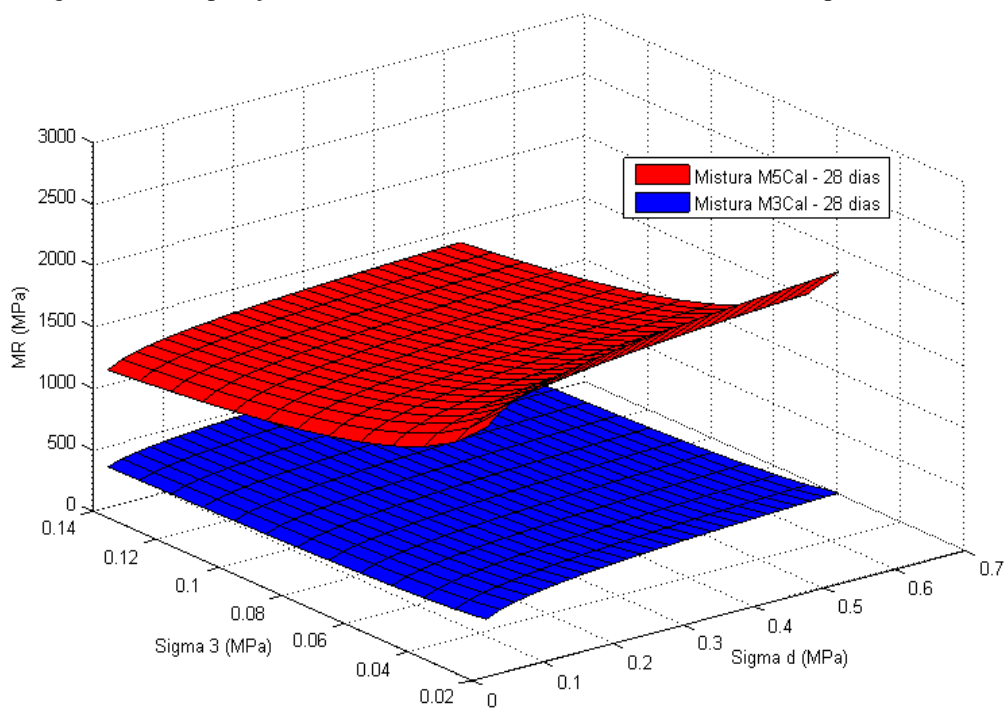
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 54 - Comparação dos valores de MR das misturas M3Cal e M5Cal para 14 dias de cura.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 55 - Comparação dos valores de MR das misturas M3Cal e M5Cal para 28 dias de cura.



Fonte: Elaborada pela autora.

4.5.4 RCS e RT das Misturas Solo+Cinza+Cal

Quanto aos resultados dos ensaios de RCS e RT, tanto as misturas M5Cal como as misturas M3Cal imediatas, ou seja, para o tempo de cura de 0 dias, não resistiram à imersão de 24 horas antes do rompimento. Já para o tempo de cura de 7 dias, apenas os 6 CPs (3 para RCS e 3 para RT) da mistura M5Cal resistiram à imersão e puderam ser rompidos, enquanto que os 6 CPs (3 para RCS e 3 para RT) da mistura M3Cal também não resistiram à imersão de 24 horas. Acredita-se que a ocorrência dos desmanches desta mistura deveu-se ao fato do pouco tempo empregado às misturas para que a cal promovesse coesão suficiente para manter os CPs intactos para a ruptura.

Todos os 24 CPs (trélicas para cada mistura, tempo de cura e ensaio) das misturas de M5Cal e M3Cal de 14 e 28 dias de cura resistiram à imersão de 24 horas e logo puderam ser levadas à prensa para rompimento dos mesmos, comprovando assim, o benefício do efeito da cal sobre as propriedades de coesão e resistência dessas misturas. As Tabelas 24 e 25 apresentam os valores encontrados para os ensaios de RCS e RT, respectivamente, com os seus respectivos resultados relacionados aos tempos de cura analisados.

Tabela 24 - Resultados do ensaio de RCS das misturas Solo+Cinza+Cal sob efeito de cura.

RCS (MPa)				
Misturas	Tempos de cura (dias)			
	0	7	14	28
M3Cal	0,00	0,00	0,97	3,76
M5Cal	0,00	0,57	1,21	3,94

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 25 - Resultados do ensaio de RT das misturas Solo+Cinza+Cal sob efeito de cura.

RT (MPa)				
Misturas	Tempos de cura (dias)			
	0	7	14	28
M3Cal	0,00	0,00	0,45	1,70
M5Cal	0,00	0,44	0,54	1,84

Fonte: Elaborada pela autora.

Araújo (2009) utilizou em sua pesquisa misturas com dois tipos de solos, um siltoso e outro argiloso, e cal em pó e em pasta nas concentrações de 3%, 5% e 7% submetidas aos tempos de cura de 0, 7, 14, 28 e 90 dias em ambas as condições. Para seus

maiores valores (um dos solos) de RCS com 5% de cal em pó, o autor obteve os valores de 0 MPa, 0,31 MPa, 0,73 MPa e 1,24 MPa para os tempos de cura de 0, 7, 14 e 28 dias, respectivamente.

Mesmo possuindo o mesmo teor de cal (em pó) de 5% nas misturas, ao comparar os resultados encontrados por Araújo (2009) e as misturas M3Cal e M5Cal, os valores de RCS do autor foram inferiores aos aqui obtidos, com exceção do valor de 0,31 MPa para 7 dias de cura com relação à mistura M3Cal, o que pode ser explicado pelo teor de 47,5% de solo do tipo A-2-4, uma areia siltosa, que provavelmente não proporcionou coesão suficiente à mistura.

Já com relação à mistura M5Cal, todos os valores encontrados pelo autor foram inferiores, o que também pode ser explicado pelo teor de 95% de cinza que a mistura M5Cal possui, proporcionando assim, ganho maior nas propriedades pozolânicas e cimentícias ao longo dos tempos de cura estudados.

Já Dias (2004) encontrou para os valores de RCS e tempos de cura de 14, 28, 60 e 90 dias, variações entre 0,42 MPa e 2,13 MPa para misturas com 9%, 12% e 25% de cal, sendo o restante da composição das suas misturas, cinza volante nos teores de 91%, 88% e 75%, respectivamente, enquanto que para a mistura M5Cal (95% de cinza e 5% de cal) os valores de RCS variaram entre 0,57 MPa, 1,21 MPa e 3,94 MPa para os tempos de cura de 7, 14 e 28 dias, respectivamente.

Ruver e Machado (2013) chegaram a encontrar para sua mistura solo+cinza+cal hidratada sem imersão um valor de RCS de 6,747 MPa. Para uma outra mistura, sendo esta submetida a imersão, os autores encontraram valores de RCS variando entre 0,038 MPa a 3,365 MPa.

Quanto ao ensaio de RT, Dias (2004) encontrou para a mistura de 9% de cal e 91% de cinza volante (28 dias de cura), um valor de RT de 0,13 MPa, já para a mistura com 25% de cal e 75% de cinza volante foram encontrados valores de 0,33 MPa e 0,45 MPa para 28 e 90 dias, respectivamente, valores estes considerados bem inferiores, se comparados à mistura M5Cal, que aos 28 dias de cura apresentou um valor de 1,84 MPa.

É sabido que as características composicionais e estruturais que determinam as propriedades tecnológicas de uma cinza estão relacionadas diretamente às condições de queima, além das características intrínsecas do carvão mineral. A norma americana ASTM C 618-05 diz que carvões do tipo betuminoso à antracito dão origem a cinzas de Classe F e carvões do tipo linhito à sub-betuminoso dão origem a cinzas de Classe C.

Cinzas de Classe C possuem em sua composição um certo teor de cal, além de possuir propriedades pozolânicas e cimentícias, diferentemente da cinza de Classe F que não possui parcela de cal em sua composição e só possui propriedades pozolânicas e não cimentícias.

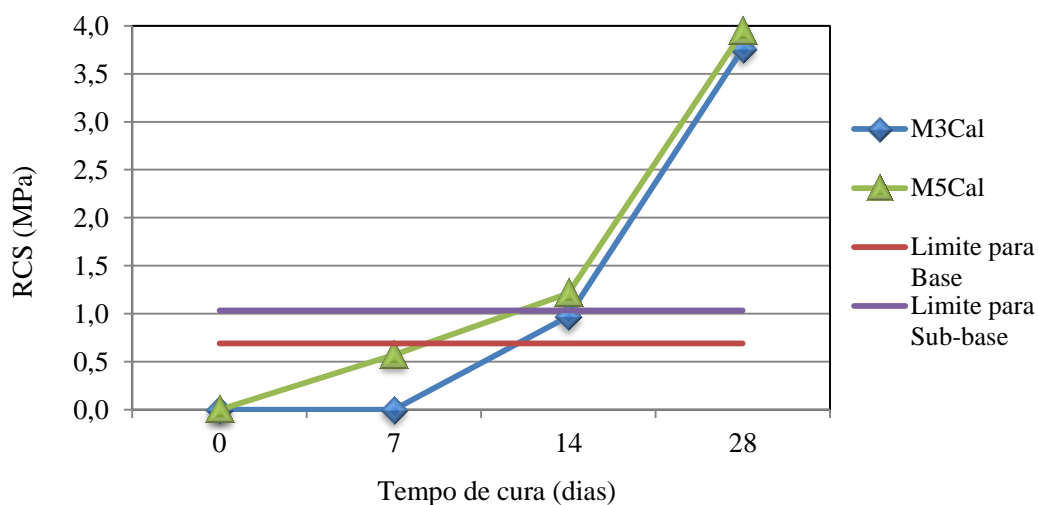
Assim, sabendo que o carvão utilizado nesta pesquisa pertence à Classe C, proveniente de carvão do tipo sub-betuminoso, e que a maioria das pesquisas realizadas na região sul/sudeste do país estudam cinzas provenientes de carvões do tipo betuminoso, portanto Classe F, explica-se o porquê dos resultados superiores daqueles em relação a estes quanto aos valores de resistências à tração.

Além dessas características intrínsecas advindas do tipo de carvão, após o processo de queima, a cinza estudada neste trabalho é submetida ao banho de “leite de cal” citado no Capítulo 2, que nada mais é do que uma solução de água e cal a uma concentração de 18% a 20% (para lavagem dos gases provenientes da queima e assentamento do material pulverulento), ou seja, na composição da própria cinza utilizada na pesquisa já há elevado teor de cal, explicando assim, as elevadas resistências encontradas para as misturas.

Diante destas afirmações, Teng Júnior (2001) comprovou em sua pesquisa que uma das vantagens de se utilizar cinzas volantes em misturas é que elas possibilitam a obtenção de resistências mecânicas superiores, particularmente em idades mais avançadas, embora o desenvolvimento de resistências na fase inicial seja mais lento.

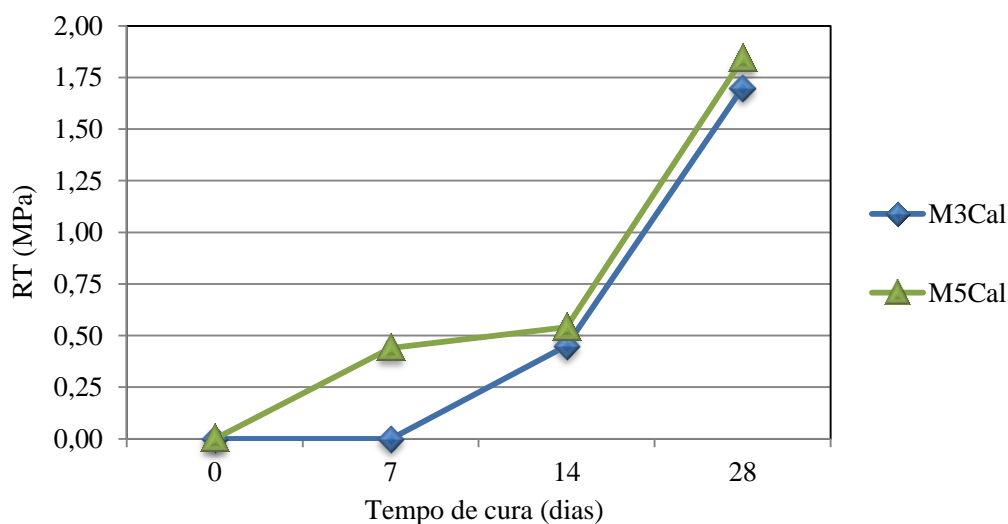
Através das Figuras 56 e 57 pode-se verificar que a cura proporcionou ganho de resistência às duas misturas para o ensaio de RCS e RT, respectivamente. Além disso, pode-se verificar que as misturas, após os 14 dias de cura, atenderam aos parâmetros mínimos exigidos pelo *Illinois Highway Departament*, citado em LITTLE (1995), sendo 0,689 MPa para sub-bases e 1,034 MPa para bases.

Figura 56 - Variação dos valores de RCS das Misturas M5Cal e M3Cal com os tempos de cura.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 57 - Variação dos valores de RT das Misturas M5Cal e M3Cal com os tempos de cura.



Fonte: Elaborada pela autora.

A partir das Figuras 56 e 57 é possível observar a semelhança dos resultados de resistência para os ensaios de RCS e RT, onde pode-se sugerir que o evento se deveu ao fato destas possuírem o teor fixo de 5% de cal em sua composição que atua como agente cimentante. A resistência aumentou de modo que quanto maior foi o tempo de cura, maior foi a resistência encontrada. As Figuras 58, 59 e 60 mostram os CPs que não resistiram à imersão, CPs no ensaio de RCS e CPs no ensaio de RT, respectivamente.

Figura 58 - Aspecto dos CPs (que não resistiram à imersão) das misturas M3Cal e M5Cal antes e depois de serem imersos em água para os ensaios de RCS e RT.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 59 - Aspecto dos CPs das misturas Solo+Cinza+Cal submetidos ao ensaio de RCS.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 60 - Aspecto dos CPs das misturas Solo+Cinza+Cal submetidos ao ensaio de RT.



Fonte: Elaborada pela autora.

4.5.5 Escolha da “melhor” Mistura Solo+Cinza+Cal para Aplicação na Pavimentação

Diante dos resultados explanados e dentre as misturas analisadas, a mistura que obteve melhores ganhos de resistência foi a mistura M5Cal de composição 95% de cinza e 5% de cal. Esta mistura apresentou CBR's de 37,0%, 110,2%, 187,4% e 218,4% para os tempos de cura de 0, 7, 14 e 28 dias de cura, respectivamente, aumentando-se em quase 6 vezes o valor mínimo para o valor máximo encontrado (de 37,0% para 218,4%), sempre superando os valores de CBR em todos os tempos de cura da mistura M3Cal.

Como citado anteriormente, o mesmo ocorreu com os valores de CBR da pesquisa de Dias (2004) que encontrou valores de CBRs de suas misturas, acima de 100% para misturas com 9%, 12% e 25% de cal, sendo o restante da composição, cinza volante nos teores de 91%, 88% e 75%, respectivamente.

O MR da mistura M5Cal, para todos os tempos de cura, superou o MR da mistura M3Cal, embora se apresentasse mais instável, resultando em uma média de 803 MPa aos 28 dias de cura, quase o dobro da rigidez apresentada pela mistura M3Cal que foi em torno de 400 MPa (média) também aos 28 dias de cura. Dias (2004) encontrou para sua mistura de 9% de cal e 91% de cinza volante, um MR de 2813 MPa aos 28 dias de cura.

Ao analisar esse ganho relevante de rigidez da mistura com 9% de cal estudada por Dias (2004) em relação à mistura M5Cal, deve ser considerado o teor da cal, que por sua vez, quase é o dobro do teor utilizado na composição da mistura M5Cal (5%), além de se presumir que o ganho de resistência não seja diretamente proporcional.

Ressalte-se também que os resultados obtidos dos ensaios de RCS e RT, para a mistura M5cal, também sempre superaram os valores obtidos para a mistura M3Cal. No tempo de cura de 7 dias, a mistura M3Cal nem resistiu à imersão, enquanto que a mistura M5Cal foi para a prensa, possibilitando o rompimento dos CPs.

Outro fator relevante também a ser considerado para eleição da melhor mistura é o fato da M5Cal usar um teor bastante elevado de cinza volante (95%). Uma vez comprovada a viabilidade ambiental desta mistura, haverá a possibilidade de um maior esgotamento da quantidade de resíduo que está armazenada nas células de estocagem da termelétrica Energia Pecém.

4.6 Análise da “Melhor Mistura” no CAP3D

Com o objetivo de comprovar a utilização da mistura M5Cal (melhor mistura testada), foi idealizada a substituição de uma camada de base de uma estrutura real de um pavimento pela mistura M5Cal. Foram utilizados os parâmetros de um trecho monitorado da BR-222, citados no artigo de (TORQUATO E SILVA *et al.*, 2015). Essa etapa de análise foi realizada pelo sistema computacional CAP3D que é um programa para análise através do Método dos Elementos Finitos que está sendo desenvolvido no LMP/UFC (HOLANDA *et al.*, 2006).

A estrutura da BR-222 é composta por um revestimento do tipo Concreto Asfáltico Usinado à Quente (CBUQ), uma camada de ligação denominada *binder*, base de Brita Graduada Simples (BGS), uma sub-base (classificação AASHTO A-2-4 de uma jazida próxima ao trecho) e subleito (base antiga da estrutura, já que ocorreu elevação do greide). Os dados de espessura, MR e Coeficiente de Poisson (ν) de cada camada estão apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 - Dados das camadas de uma estrutura asfáltica analisadas no CAP3D.

Camadas	Espessura (cm)	MR (MPa)	ν
CBUQ	5,0	4027	0,30
<i>Binder</i>	6,0	4651	0,30
BGS	15,0	137	0,35
Base proposta (M5Cal)		803	
Sub-base	15,0	120	0,35
Subleito	100,0*	600	0,40

Fonte: Própria autora com base no artigo de Torquato e Silva *et al.*, 2015.

Nota:

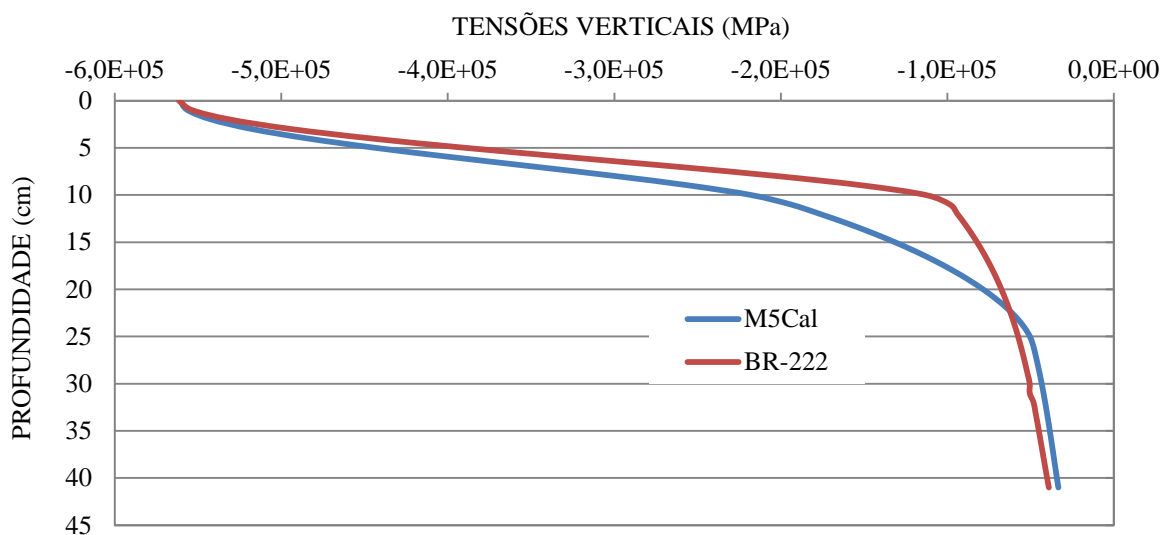
*No programa CAP3D, para o subleito foi considerado uma espessura de 100 cm.

Os MRs obtidos por Torquato e Silva *et al.* (2015) foram através de ensaios laboratoriais, diferentemente ocorrido para o subleito que, por se tratar de uma base antiga, não foi possível realizar os mesmos ensaios, assim, seus dados resultaram de uma retroanálise realizada no CAP3D a partir dos ensaios de deflexão obtidos pelo equipamento *Falling Weight Deflectometer* (FWD) para determinação do MR. A retroanálise resultou em um MR aproximado de 600 MPa, atipicamente elevado, justamente por se tratar de uma base de pavimento antigo que estava sendo restaurado.

Para a comparação das análises, no programa CAP3D foi analisada a estrutura real e, dentre os produtos da mesma, foram coletados os dados das tensões verticais, deformações

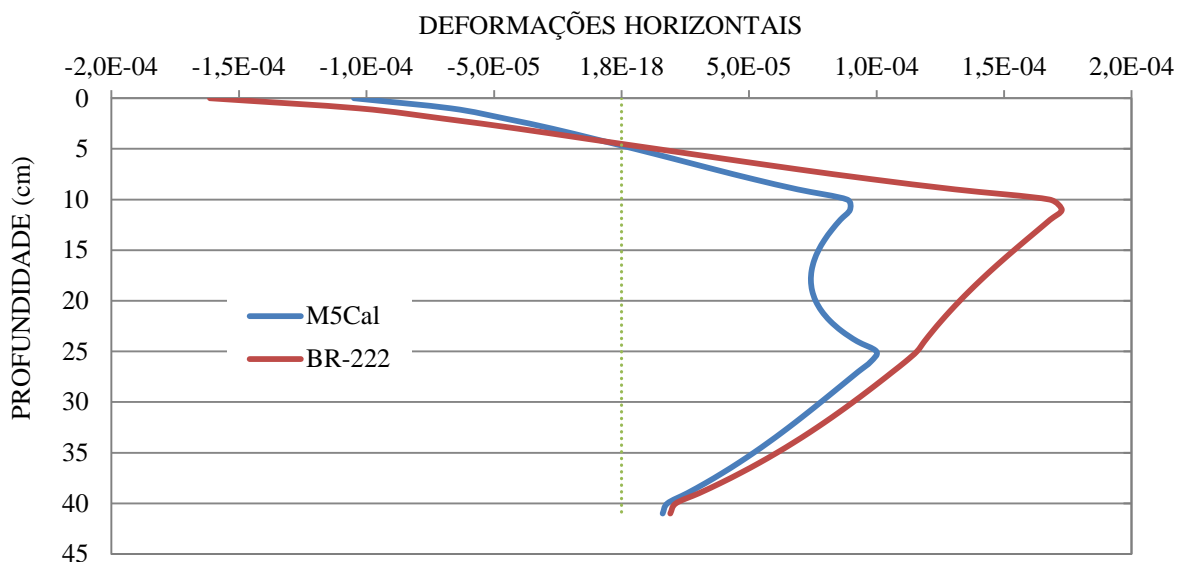
horizontais e deslocamentos em toda profundidade da estrutura. Em seguida, manteve-se a mesma estrutura, substituindo-se a camada de base pela base de M5Cal e coletados os mesmos parâmetros. Foi possível plotar os gráficos apresentados nas Figuras 61 (Tensões Verticais x Profundidade) e 62 (Deformações Horizontais x Profundidade).

Figura 61 - Tensões Verticais x Profundidade da estrutura BR-222 (real) e da estrutura com base M5Cal.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 62 - Deformações Horizontais x Profundidade da estrutura BR-222 (real) e da estrutura com base M5Cal.



Fonte: Elaborada pela autora.

No gráfico da Figura 61 é possível observar que na Estrutura da BR-222, toda a distribuição das tensões está sendo absorvida pelas camadas superiores (revestimento e *binder*), isso acontece porque material com rigidez maior (neste caso acima de 4000 MPa)

tende a absorver mais tensões. Como a base possui uma rigidez de 137 MPa, muito pequena em relação às camadas superiores, é como se esta camada não pudesse suportar e absorver quase nenhuma tensão. À priori, esse tipo de distribuição de tensões não apresentará defeitos precoces de fadiga, desde que os materiais utilizados e seus processos de execução possuam garantias tecnológicas.

Ao se substituir a base real pela base M5Cal, que possui uma rigidez de 803 MPa (média), a distribuição se torna mais uniforme (a partir da profundidade de 11 cm, onde começa a camada de base) ao longo da estrutura, fazendo com que toda a responsabilidade, antes só absorvida pelas camadas superiores, seja agora “diluída” nas demais camadas e tornando a vida útil dessa estrutura maior que a vida útil da estrutura da BR-222 (se esta apresentar materiais ruins nas camadas superiores). Além disso, na estrutura com base M5Cal, as tensões verticais que chegam no topo do subleito são 15% menores do que as tensões que chegam no topo do subleito da estrutura real, fator esse benéfico para evitar deformações permanentes excessivas, conforme mostra a Tabela 27, que compara alguns pontos críticos nas duas estruturas.

Tabela 27 - Comparação dos pontos críticos analisados pelo CAP3D das estruturas de bases BGS e M5Cal.

Pontos críticos analisados	Base BGS	Base M5Cal	Benefício
Deflexão no topo do pavimento (m)	1,65E-04	1,07E-04	-35%
Deformação horizontal na fibra inferior da camada de CBUQ	1,36E-05	5,24E-06	-61%
Deformação horizontal na fibra inferior da camada de <i>binder</i>	1,73E-04	8,96E-05	-48%
Tensão vertical no topo do subleito (MPa)	-3,90E+04	-3,33E+04	-15%

Fonte: Elaborada pela autora.

No gráfico da Figura 62, é possível observar a diminuição das deformações horizontais em toda estrutura, principalmente na fibra inferior das camadas asfálticas, chegando a 61% a menos na fibra inferior da camada de rolamento CBUQ e 48% a menos na fibra inferior da camada de *binder*, como pode ser visualizado na Tabela 27. Esses valores significam menores possibilidades de surgimento de trincamento por fadiga na estrutura, defeito este que compromete a vida útil do pavimento por ocasionar fissuras facilitando a infiltração das águas das chuvas por capilaridade. Houve também a diminuição da deflexão no topo do pavimento, ponto crítico avaliado por indicar o surgimento de fissuras por fadiga, ocorridas de cima para baixo na estrutura.

4.7 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados e discutidos os resultados obtidos na pesquisa. Os resultados dos ensaios de caracterização, ensaios de resistência e os ensaios ambientais para o solo, para a cinza volante e para as misturas solo+cinza e solo+cinza+cal. Além disso, foram analisadas duas estruturas no CAP3D e comparadas a fim de mostrar a viabilidade da “melhor mistura” testada. No capítulo seguinte são mencionadas as principais conclusões obtidas acerca do estudo, bem como feitas algumas sugestões para trabalhos futuros.

5 CONCLUSÃO

5.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas acerca do trabalho desenvolvido, bem como as sugestões para estudos futuros. As conclusões e sugestões são referentes ao estudo desenvolvido que teve como objetivo verificar a possibilidade do aproveitamento das cinzas volantes provenientes de uma termelétrica situada na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF) para o uso em camadas granulares dos pavimentos.

As análises foram feitas a partir dos resultados obtidos dos ensaios realizados, decorrentes do programa experimental aplicado e desenvolvido em laboratório sob condições específicas.

5.2 Principais Conclusões

5.2.1 *Conclusões quanto ao Solo Natural de Caucaia Estudado*

O resultado de densidade real do solo foi de $2,457 \text{ g/cm}^3$ e LL e LP foram 15% e 12%, respectivamente. De posse desses resultados de LL e LP, sendo assim o valor de IP igual a 3%, o que classifica o solo como um material pouco plástico. A distribuição granulométrica do solo apresenta-se contínua, possuindo grãos com várias dimensões. A quantidade de finos (#200) do material é de 34,5%, o que pode possibilitar uma maior interação com a cal e a classificação pelo sistema AASHTO, foi um solo do tipo A-2-4, uma areia siltosa com previsão de comportamento de excelente a bom como subleito, assim podendo ser aplicado, preliminarmente, em camadas granulares de pavimento, uma vez que apresenta índices que atendem aos limites estabelecidos pelo DNIT que limita os valores do LL e do IP em 25% e 6%, respectivamente.

O solo foi compactado na energia intermediária (26 golpes) e forneceu, através da curva de compactação, um valor de $2,075 \text{ g/cm}^3$ para a massa específica seca máxima e 9,7% para a umidade ótima. Na mesma energia, o CBR apresentou um valor de 4,3%, sendo esse valor considerado muito baixo. Quanto à expansão, o solo atendeu aos limites estabelecidos (máximo de 1% para sub-base) pelo DNIT, possuindo uma média de expansão de 0,18%. Esse

valor de CBR baixo pode ser explicado pela considerável porcentagem de finos (#200: 34,5%) presentes no solo.

Os resultados de MR do solo foram analisados através do modelo composto ($MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3}$) foi o que melhor representou o comportamento do MR do solo estudado, já que os modelos que variam o MR com a tensão desvio ($MR = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2}$) e com a tensão confinante ($MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2}$), separadamente, possuem um coeficiente de correlação (R^2) bem abaixo do valor 1. A média obtida de MR para o solo foi em torno de 57 MPa. O comportamento do solo diante do carregamento depende mais da tensão desviatória do que da tensão de confinamento. Isso deve ocorrer pela parcela de argila (20,6%) presente na composição do solo.

Quanto aos resultados dos ensaios de RCS e RT, os CPs não resistiram à imersão de 24 horas antes do rompimento, desintegrando-se em no máximo 2 horas após imersão.

5.2.2 Conclusões quanto à Cinza Volante Estudada

A densidade real da cinza volante resultou em um valor de 2,317 g/cm³ e os resultados dos limites de Atterberg mostraram que a cinza volante é um material NL e NP, apresentando, assim, um valor de IP = 0. Quanto à distribuição granulométrica, 100% das partículas da cinza volante passaram na peneira #200 (0,075 mm), tendo a 93,3% de silte e 6,7% de argila. Como 100% das partículas da cinza volante estão abaixo de 75µm (0,075 mm), esta cinza está de acordo com a definição geral de cinza volante que diz que as partículas devem estar compreendidas entre os diâmetros de 5µm e 100 µm (0,005mm e 0,1mm).

Quanto à classificação pelo sistema AASHTO, a cinza é classificada como sendo equivalente a um solo do tipo A-4 (solo siltoso com previsão de comportamento de sofrível a mau como subleito).

A cinza volante também foi compactada na energia intermediária, apresentando uma massa específica seca máxima de 1,508 g/cm³ e umidade ótima de 20%. Para o ensaio de CBR, a cinza volante apresentou uma resistência à penetração maior do que a resistência encontrada no solo, apresentando um valor de 26,6%, sendo esse valor considerado recomendado ($CBR \geq 20\%$) para uma camada de sub-base de pavimento, porém o material foi considerado muito expansivo, apresentando uma média de 3,72% para três CPs ensaiados e

não atendendo ao valor mínimo estipulado para camada de sub-base (expansão de no máximo 1%).

Os resultados de MR da cinza volante também foram analisados através do modelo composto, assim como o solo, apresentando uma média de 236 MPa que apresentou uma superfície que depende mais da tensão desviatória do que da tensão de confinamento, o que está de acordo com o que a literatura aponta quando diz que o MR de solos coesivos dependem mais da tensão desvio do que da tensão confinante.

Quanto aos resultados dos ensaios de RCS e RT, verificou-se, assim como o solo de Caucaia, que os CPs também não resistiram à imersão de 24 horas antes do rompimento. Os CPs se desfizeram em menos de 30 minutos de imersão.

Para os ensaios ambientais, o ensaio de extratos lixiviado não apresentou seus parâmetros inorgânicos e orgânicos acima dos limites estabelecidos, já o ensaio de extrato solubilizado apresentou 6 parâmetros inorgânicos, de um total de 21 parâmetros analisados, acima dos limites estabelecidos (alumínio, arsênio, cromo, fluoreto, selênio e sulfato). Assim, em função dos resultados obtidos, a amostra de cinza deve ser classificada como Classe II A - Resíduo Não Inerte, o que não a desclassifica como agente cimentante em misturas com solo, já que, considerando o ensaio de Extrato Lixiviado, que representa a infiltração das águas das chuvas no solo, todos os parâmetros analisados encontraram-se dentro dos limites permitidos.

5.2.3 Conclusões quanto às Misturas Solo+Cinza Estudadas

Todas as misturas (M1: 100S+0CV, M2: 70S+30CV, M3: 50S+50CV, M4: 30S+70CV e M5: 0S+100CV) foram compactadas na energia intermediária e foi possível verificar que houve acréscimo da umidade ótima e diminuição da massa específica seca máxima das misturas em função do aumento do teor de cinza na mistura. Isso se deve ao fato da densidade real da cinza (2,317 g/cm³) ser menor do que a densidade real do solo (2,457 g/cm³).

Quanto aos resultados de CBR, as misturas M3, M4 e M5 apresentaram uma resistência à penetração semelhante entre si (em torno de 30%), se comparadas às outras duas misturas (M1: 4,3% e M2: 11,5%). Tais misturas apresentaram valores maiores do que 20%, valor este considerado pelos órgãos rodoviários, o mínimo adequado para uso em camada de sub-base de pavimento.

Já quanto à expansão essas três misturas (M3, M4 e M5) não atenderam ao limite exigido que é no máximo de 1% (sub-base), possuindo uma média de variação entre 1,98% a

4,07%, assim não estando aptas para serem usadas em camadas mais nobres (base e sub-base) dos pavimentos, necessitando um tratamento para a redução da expansão antes de qualquer aplicação. Esses valores maiores que 1% de expansão caracterizam materiais muito expansivos e essa propriedade é facilmente explicada pela grande concentração de cinza na composição dessas misturas.

Para os resultados de MR, o modelo composto também foi aplicado e foi possível observar através das superfícies obtidas que o MR do solo é o menor, ou seja, menor é a sua capacidade de se recuperar diante de um determinado carregamento. Também, é possível observar que o módulo vai aumentando conforme se aumenta o teor de cinza nas misturas, até alcançar a composição 100% de cinza (M5). A mistura M5 é a que apresenta o maior módulo resiliente, embora apresente a superfície menos estável dentre as misturas testadas. Além disso, o comportamento das misturas, assim como o comportamento do solo de Caucaia e da cinza volante, depende mais da tensão desviatória do que da tensão de confinamento, sendo esta última uma característica de materiais de natureza coesiva.

Quanto aos resultados dos ensaios de RCS e RT, verificou-se, assim como o solo de Caucaia (M1) e a cinza (M5), que os CPs das misturas M2, M3 e M4 também não resistiram à imersão de 24 horas antes do rompimento. A ocorrência dos desmanches deveu-se ao fato das misturas não conterem um material que promova coesão.

5.2.4 Conclusões quanto à escolha das Melhores Misturas Solo+Cinza

Diante do desempenho tecnológico das misturas testadas, foi possível escolher 2 misturas (M3 e M5) que obtiveram os melhores resultados, que foram submetidas à adição de um teor fixo de 5% de cal (baseado na literatura), além da verificação do comportamento dessas misturas sob o efeito de cura nos tempos de 0, 7, 14 e 28 dias.

As misturas M3 e M5 foram escolhidas por apresentarem altos teores de cinza e apresentarem CBR's relativamente próximos, 31,3% e 26,6%, respectivamente. Como a expansão não atendeu aos limites estabelecidos, esta será uma propriedade a ser avaliada, pois permitirá a verificação da redução ou não da variação de volume diante da adição de cal e dos tempos de cura. Resumidamente, essas duas misturas também foram selecionadas em função de terem apresentado o maior valor de CBR (M3) e o maior teor de cinza (M5).

O MR da M3 possui o comportamento mais estável dentre as cinco misturas enquanto que o da M5 é o menos estável, porém de valor maior do que M3, assim, é

encorajador observar o que poderia acontecer a essas misturas após o acréscimo da cal durante os tempos de cura investigados.

Todas as cinco misturas não resistiram à imersão de 24 horas em água antes do rompimento para os dois ensaios. Uma indicação positiva, do processo de estabilização química, seria o simples fato dos CPs moldados para esses dois ensaios resistirem à imersão e serem levados à prensa para posterior rompimento.

5.2.5 Conclusões quanto às Misturas Solo+Cinza+Cal Estudadas

Todos os ensaios realizados com as misturas solo+cinza foram reproduzidos para as duas melhores misturas escolhidas, M3 e M5, que foram renomeadas em M3Cal e M5Cal, respectivamente com a diferença do efeito de cura e a adição de um teor fixo de 5% da cal. Foi identificado um aumento da umidade ótima e um decréscimo da massa específica seca máxima das misturas M3Cal e M5Cal em relação às misturas M3 e M5, respectivamente. Isso ocorre devido o acréscimo da cal na composição das novas misturas.

Quanto aos ensaios de CBR, foi possível constatar o ganho de resistências nas misturas pelo simples fato de se adicionar cal as mesmas. Esse ganho de resistência em ambas as misturas já era esperado pelo conhecimento do comportamento cimentante da cal. Porém, observa-se que a mistura M5 tinha inicialmente um valor de CBR menor do que a mistura M3. Ao ser adicionada cal em ambas as composições foi constatado um valor de CBR maior para a mistura M5Cal do que o CBR da mistura M3Cal. Isso deve-se a maior interação da cal com a cinza, já que a mistura M5 era composta de 100% de cinza, enquanto que a mistura M3 possuía em sua composição 50% de cinza. Percebe-se ainda que os valores de CBR da mistura M5Cal são sempre maiores que os CBR's da mistura M3Cal no decorrer dos tempos de cura analisados: 0, 7, 14 e 28 dias.

Quanto à expansão as duas misturas atenderam ao limite exigido que é no máximo 1%, já que as duas apresentaram expansão zero para todos os tempos de cura. Dessa forma, considerando apenas o ensaio de CBR, pode-se afirmar que as duas misturas M5Cal e M3Cal podem ser utilizadas em camadas de bases de pavimentos, já que o limite mínimo exigido de aplicação para essa camada é de um CBR de 60%, geralmente, e expansão de até 0,5%.

Quanto ao MR das misturas M3Cal e M5Cal ao longo dos tempos de cura, identifica-se seu aumento à medida que o tempo passa, ou seja, o efeito da cura é positivo para esta mistura. Além disso, pode-se perceber que a inserção da cal continua a fazer o comportamento da mistura depender mais da tensão desviatória do que da tensão de

confinamento. Também foi utilizado o modelo composto para analisar os resultados e detectado que a mistura M5Cal possui valores de MR maiores do que os da mistura M3Cal, embora as superfícies da mistura M5Cal apresentem maiores instabilidades.

Quanto aos resultados dos ensaios de RCS e RT, para o tempo de cura de 0 dias, as duas misturas M3Cal e M5Cal, não resistiram à imersão de 24 horas antes do rompimento. Já para o tempo de cura de 7 dias, apenas a mistura M5Cal resistiu à imersão para posterior rompimento, resultando em um RCS de 0,57 MPa e RT de 0,44 MPa. A mistura M3Cal também não resistiram à imersão de 24 horas. Acredita-se que a ocorrência dos desmanches desta mistura deveu-se ao fato do pouco tempo empregado às misturas para que a cal promovesse coesão suficiente para manter os CPs intactos para a ruptura.

Para os tempos de cura de 14 e 28 dias, todos os CPs das misturas de M3Cal e M5Cal resistiram à imersão de 24 horas e logo puderam ser levados à prensa para rompimento dos mesmos, comprovando assim, o benefício do efeito da cal sobre as propriedades de coesão e resistência dessas misturas. Para o tempo de cura de 14 dias, a mistura M3Cal resultou em um RCS de 0,97 MPa e RT de 0,45 MPa e para a mistura M5Cal foi obtido um RCS de 1,21 MPa e RT de 0,54 MPa. Para o tempo de cura de 28 dias, a mistura M3Cal resultou em um RCS de 3,76 MPa e RT de 1,70 MPa e para a mistura M5Cal foi obtido um RCS de 3,94 MPa e RT de 1,84 MPa.

Analisando separadamente os tempos de cura de 14 e 28 dias, pode-se observar que os resultados se apresentam semelhantes, essa situação pode ter ocorrência pelo fato das misturas possuírem o teor de cal fixo em 5%. Para se comprovar ou não tal fato, seria necessário ter estudado misturas que contivessem teores de cal diferentes a 5%.

A grande resistência encontrada dos CPs das misturas deveu-se ao fato destas possuírem cal em sua composição que atua como agente cimentante, além da inserção de “leite de cal” para lavagem dos gases, ainda dentro da termelétrica, e da adição de 5% de cal inserida nas misturas através da pesquisa. Essa resistência aumentou de modo que quanto maior foi o tempo de cura, maior foi a resistência encontrada.

5.2.6 Conclusões quanto à Escolha da “melhor” Mistura Solo+Cinza+Cal para Aplicação na Pavimentação

Diante dos resultados obtidos, a mistura que obteve melhores ganhos de resistência foi a mistura M5Cal de composição 95% de cinza e 5% de cal. Esta mistura

apresentou CBR's de 37,0%, 110,2%, 187,4% e 218,4% para os tempos de cura de 0, 7, 14 e 28 dias de cura, respectivamente.

O MR da mistura M5Cal, para todos os tempos de cura, superou o MR da mistura M3Cal, embora se apresentasse mais instável, resultando em uma média de 803 MPa aos 28 dias de cura, quase o dobro da rigidez apresentada pela mistura M3Cal que foi em torno de 400 MPa (média) também aos 28 dias de cura.

Os resultados obtidos dos ensaios de RCS e RT, para a mistura M5cal, também sempre superaram os valores obtidos para a mistura M3Cal. No tempo de cura de 7 dias, a mistura M3Cal nem resistiu à imersão, enquanto que a mistura M5Cal foi para a prensa, possibilitando o rompimento dos CPs.

Outro fator relevante também a ser considerado para eleição da melhor mistura é o fato da M5Cal usar um teor bastante elevado de cinza volante (95%). Uma vez comprovada a viabilidade ambiental desta mistura, haverá a possibilidade de um maior esgotamento da quantidade de resíduo.

5.2.7 Conclusões quanto à Análise da “Melhor Mistura” no CAP3D

Foi utilizado o programa CAP3D para comparar duas estruturas, uma com a base de M5Cal (“melhor mistura”) e a outra com uma base de BGS. Para a comparação, foram coletados os dados das tensões verticais, deformações horizontais e deslocamentos em toda profundidade da estrutura. Ao se substituir a base real pela base M5Cal, que possui uma rigidez de 803 MPa (média), a distribuição se torna mais uniforme (a partir da profundidade de 11 cm, onde começa a camada de base) ao longo da estrutura, fazendo com que toda a responsabilidade, antes só absorvida pelas camadas superiores, seja agora “diluída” nas demais camadas, tornando a vida útil dessa estrutura maior que a vida útil da estrutura com base de BGS.

Além disso, na estrutura com base M5Cal, as tensões verticais que chegam no topo do subleito são 15% menores do que as tensões que chegam no topo do subleito da estrutura com base de BGS, fator esse benéfico para evitar deformações permanentes excessivas. Também é possível observar a diminuição das deformações horizontais em toda estrutura, principalmente na fibra inferior das camadas asfálticas, chegando a 61% a menos na fibra inferior da camada de rolamento CBUQ e 48% a menos na fibra inferior da camada de *binder*, além da diminuição da deflexão no topo do pavimento, ponto crítico avaliado por indicar o surgimento de fissuras por fadiga, ocorridas de cima para baixo na estrutura.

5.3 Principais Sugestões e Recomendações para Estudos Futuros

Objetivando complementar o estudo dada a relevância existente do mesmo, listou-se algumas sugestões e recomendações quanto à aplicabilidade das cinzas volantes de carvão mineral em misturas para camadas granulares:

- a) avaliar quimicamente as possíveis reações existentes entre o solo, a cinza volante e o agente cimentante (cal) ao longo dos tempos de cura;
- b) analisar as melhores misturas, solo+cinza e solo+cinza+cal, sob os resultados de ensaios ambientais para que assim, se possa estudar a melhor maneira de tornar possível o uso de cinzas volantes em camadas granulares;
- c) propor um dimensionamento de pavimento com a utilização dessa mistura, a partir da melhor avaliação da cinza volante, em determinada composição,;
- d) estudar a viabilidade econômica e ambiental do uso de cinzas volantes de carvão mineral em camadas granulares de pavimentos;
- e) aplicar em trechos experimentais bases de misturas solo+cinza e/ou solo+cinza+cal, monitorando seus comportamentos mecânicos e interações ambientais no decorrer do tempo;
- f) aprofundar o estudo do comportamento tensão-deformação de misturas solo+cinza e solo+cinza+cal para utilização em obras geotécnicas de outra natureza, com diferentes tipos de solos, avaliando-os através de ensaios triaxiais;
- g) realizar análise mecânica-empírica nos resultados obtidos para outros níveis de tráfego, bem como, testar os resultados em diversos modelos constitutivos para análises de pavimentos.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CARVÃO MINERAL – ABCM. **Reservas de carvão mineral**. Disponível em: <<http://www.carvaomineral.com.br/>> Acesso em: agosto/2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7175**: Cal hidratada para argamassas – Requisitos. Rio de Janeiro, 2003.
- _____. **NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **NBR 10005**: Lixiviação de Resíduos – Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **NBR 10006**: Solubilização de Resíduos – Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **NBR 12253**: Solo-cimento: Dosagem para emprego como camada de pavimento. Rio de Janeiro, 1992.
- ANDRÉ RIBEIRO GEOGRAFIA. **Ciclo do processo de geração e transmissão de energia de uma usina termelétrica**. Disponível em: <andreribeiroeageografia.blogspot.com.br> Acesso em: agosto/2014.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Autorização de operações das usinas termelétricas**. Disponível em: <aneel.gov.br> Acesso em: agosto/2014.
- ANUÁRIO ESTATÍSTICO DE ENERGIA ELÉTRICA REFERENTE AO ANO DE 2013. **Capacidade de potência instalada para geração de energia elétrica no Brasil**. Elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE). 2014.
- ARAÚJO, A.F. **Avaliação de misturas de solos estabilizados com cal, em pó e em pasta, para aplicação em rodovias do estado do ceará**. Dissertação de Mestrado. Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE, 2009.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Specifications for fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in Portland cement**. ASTM-C-618. 1989.
- AZEVEDO, A.L.C.; OLIVEIRA JÚNIOR, A.; PEDROSA, R.A.A.; RAMALHO, R.W. **Estabilização de Solos com Adição de Cal**. Revista Vias Gerais, Publicação do Centro de Transferência de Tecnologia do PIH/IPC – DER/MG, Minas Gerais. 1998.
- BAPTISTA, C.F.N. **Ensaio fundamentais para a pavimentação e dimensionamento dos pavimentos flexíveis**. Vol. 1, 2ª Edição, Editora Globo, Porto Alegre, RS, 1976.
- BARROS, K.S. **Avaliação do emprego de solo contaminado por derivados de petróleo em camadas granulares de pavimentos utilizando a cal como agente estabilizante**. Monografia. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE, 2011.

BARTH, E.F. **An overview of the history, present status, and future direction of solidification/stabilization technologies for hazardous waste treatment.** Elsevier, Journal of Hazardous Materials, Amsterdam, 1990.

BASTOS, J.B.S. **Estudo da influência da variação da umidade no comportamento de pavimentos da Região Metropolitana de Fortaleza.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 187 fl, 2013.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL DE 2014 - BEN 2014. **Consumo per capita de energia da população do Ceará em 2013.** Produzido pela Empresa de Pesquisa Energética – EPE. Rio de Janeiro, 2014.

BERNUCCI, L.L.B.; MOTTA, L.M.G.; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J.B. **Pavimentação Asfáltica - Formação Básica para Engenheiros.** Rio de Janeiro: Petrobras: ABEDA. 2010.

BRAGA, F.S.; FONSECA, M.H.G.P.; AGOSTINI, R.M.; SILVA, V.V.; LOPES, V.L.; **Encapsulamento: uma alternativa para o tratamento e destinação final de resíduos oleosos – um enfoque ambiental (estudos preliminares).** VI Simpósio Ítalo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Set, Vitória, ES, 2002.

CABERLON, R.C.; HEINECK, K.S.; CONSOLI, N.C. **Adição de cal de carbureto em um solo contaminado encapsulado com cimento portland.** III GEORS - Seminário de Engenharia Geotécnica do Rio Grande do Sul, 2005.

CAMARA, L.D. de O. **Estudo do comportamento de materiais alternativos e suas aplicações na engenharia geotécnica.** Iniciação Científica. (Graduanda em Engenharia Ambiental) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Orientadora: Michéle Dal Toé Casagrande, 2011.

CARVALHO, J.B.Q. **Propriedade e comportamento de solos lateríticos estabilizados com cal.** 22ª Reunião Anual de Pavimentação, ABVp, Florianópolis, SC, 1988.

CAVALCANTE, F.C.I.T.; BARROSO, S.H.A. **Influência da energia de compactação e do teor de areia na estabilização granulométrica de bases e sub-bases de pavimentos.** Universidade Federal do Ceará. Departamento de Engenharia de Transportes, 2009.

CORDEIRO, J.F.S. **Estabilização química e solidificação do resíduo oleoso gerado nas atividades de E&P de petróleo, com solo para o uso em camadas de bases e/ou sub-bases de pavimentos rodoviários.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB, 2007.

DAWSON, A.R.; BULLEN, F. **Furnace Botton Ash. Its Engineering Properties and its Use as Sub-base Material.** Proc. Institute of Civil Engineers, 1991.

DIAS, C.R.C. **Estudo de misturas de areia-asfalto e cinza cal para emprego em pavimentos urbanos.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil 127 p. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNER-ME 041: Solos – preparação de amostras para caracterização.** 1994.

_____. **DNER-ME 049:** Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia para não amostras trabalhadas. 1994.

_____. **DNER-ME 051:** Solos – Análise granulométrica. 1994.

_____. **DNER-ME 082:** Solos – Determinação do limite de plasticidade. 1994.

_____. **DNER-ME 093:** Solo – Densidade Real. 1994.

_____. **DNER-ME 122:** Solos – Determinação do limite de liquidez – método de referência e método expedito. 1994.

_____. **DNIT 134-ME:** Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência. 2010.

_____. **DNER-ME-162:** Solos – ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas. 1994.

_____. **DNER-ME 180:** Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – determinação da resistência à compressão simples. 1994.

_____. **DNER-ME 181:** Solos estabilizados com cinza volante e cal hidratada – determinação da resistência à tração por compressão diametral. 1994.

_____. **Manual de Pavimentação**, 2006.

ENERGIA PECÉM. **Termelétrica Energia Pecém**. Disponível em: <energiapecem.com.br> Acesso em: agosto/2014.

EPA - ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Profile of the oil and gas extraction industry**. Notebook project oil and gas extraction, Sector Notebook Project, EPA/310-R-99-006. Outubro, 2000.

FARIAS, E.R. **A utilização de misturas solo/cinza pesada na pavimentação - análise de aspectos de comportamento mecânico e ambiental**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2005.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Tipos de cinzas e composição**. Disponível em: <http://www.fhwa.dot.gov> Acesso em: outubro/2014.

FONSECA, M.H.G.P. **Estudo do resíduo oleoso das atividades de exploração e produção de petróleo na manutenção de estradas de terra – Enfoque ambiental**. Dissertação de Mestrado, UFES, Vitória, ES, 2003.

FURNAS. **Processo de geração e transmissão de energia de uma termelétrica**. Disponível em: <furnas.com.br> Acesso em: outubro/2014.

GONDIM, L.M. **Estudo experimental de misturas solo-emulsão aplicado às rodovias do agropólo do Baixo Jaguaribe/Estado do Ceará**. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 213 fl. 2008.

GOOGLE MAPS. **Localizações da termelétrica, jazida do solo.** Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/>> Acesso em: outubro/2014.

GUIMARÃES, J.E.P. **A cal – Fundamentos e aplicações na engenharia civil.** 2ª Ed. São Paulo: PINI, 2002.

HOLANDA, A.S.; MELO, L.T.B.de; SOARES, J.B. **Finite Element Modeling of Flexible Pavements.** XXVII Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, CILAMCE, Pará - Brasil. 2006.

INFOESCOLA. **Tipos de carvões.** Disponível em: <<http://www.infoescola.com/>> Acesso em: maio/2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **População do Brasil e do estado do Ceará.** Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/>> Acesso em: maio/2014.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ - IPECE, 2014. **Região Metropolitana de Fortaleza – RMF.** Disponível em: <<http://www.ipece.ce.gov.br/>> Acesso em: maio/2014.

INSTITUTO DE PLANEJAMENTO DO ESTADO DO CEARÁ – IPLANCE, 2014. **Dados da Região Metropolitana de Fortaleza.** Disponível em: <<http://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/>> Acesso em: maio/2014.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA, 2011. **Fontes de energia elétricas no mundo.** Disponível em: <<http://www.iea.org/>> Acesso em: junho/2014.

KNOP, A. **Estabilização de solos contaminados por hidrocarbonetos.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003.

LEANDRO, R.P.; FABBRI, G.T.P. **Aproveitamento da cinza pesada de carvão mineral da construção de bases e sub-bases de pavimentos flexíveis.** In: Panorama Nacional da Pesquisa em Transportes 2009, Vitória - ES. Anais do Panorama Nacional da Pesquisa em Transportes, 2009.

LITTLE, D.N. **Evaluation of structural properties of lime stabilized soils and aggregates.** Volume 1: Summary of Findings. Prepared for the National Lime Association, 1999.

LITTLE, D.N. **Stabilization of pavement subgrades and base courses with lime,** Published by Kendall/Hunt Publishing Company, 1995.

LOIOLA, P.R.R.; BARROSO, S.H.A. **Aplicação da técnica de solo cal na construção da rodovia do melão no estado do ceará.** Anais da 37ª Reunião Anual de Pavimentação. Goiânia, GO, 2007.

LOPES, L.dos S.E. **Análise do Comportamento Mecânico e Ambiental de Misturas Solo-Cinzas de Carvão Mineral para Camadas de Base de Pavimentos.** Master, Civil Engineering Department PUC-Rio, 2011.

LOIOLA, P.R.R.; NOBRE JÚNIOR, E.F. **Trecho experimental utilizando mistura de solo-cal no município de Limoeiro do Norte-Ceará.** In: VI ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA. Brasília, Distrito Federal, 2001.

MALLELA, J.; QUINTUS, P.E.H.V.; SMITH, K.L. **Consideration of lime-stabilized layers in mechanistic-empirical pavement design.** Prepared for The National Lime Association, 2004.

MARCON, A.F. **Durabilidade e módulo de elasticidade de misturas areia-cal-cinza volante.** Tese (Mestre em ciência). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. UFRJ, 1977.

NARDI, J.V. **Estabilização de areia com cinza volante e cal – Efeito do cimento como aditivo e de brita na mistura.** Tese: Mestre. COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Rio de Janeiro, 1975.

OLIVEIRA, P.V. **Aplicabilidade de resíduos e rejeitos ambientais para aproveitamento em pavimentação.** Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio. Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, 2011.

PET ARQUITETURA/UFC. **Nova configuração da Região Metropolitana de Fortaleza.** Disponível em: <pet.arquitetura.ufc.br> de acordo com <idades.ce.gov.br, 2014> Acesso em: junho/2015.

PINTO, S. **Estabilização de areia com cal e cinza volante.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1971.

PORTAL BRASIL DO GOVERNO. **Reservas provadas no país.** Disponível em: <www.brasil.gov.br/infraestrutura> Acesso em: maio/2014.

PORTAL PECÉM. **A termelétrica Energia Pecém dentro do Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP).** Disponível em: <portalpecem.com.br> Acesso em: maio/2014.

QUIMLAB. **Efeitos dos Elementos Químicos.** Disponível em: <http://www.quimlab.com.br/guiadoselementos/variaveis_quimicas.htm> Acesso em: maio/2015.

RABASSA, C.M.; SANTOS, L.C.; BASTOS, C.A.B. **Estabilização físico-química de um solo arenoso fino com cal e cimento.** XXI Congresso de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia, 2006.

RUVER, C.A.; CRUZ, R.C.; KNOP, A.; CONSOLI, N.C.; HEINECK, K.S. **Uso do equipamento de lixiviação em coluna para análise da eficiência do método de solidificação e estabilização de solos contaminados.** In: XVIII Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia (CRICTE2003), 2003, Itajaí/SC. Anais do XVIII Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia. Itajaí/SC, Univali, 2003.

RUVER, C.A e MACHADO, C.R. **Base granular tradicional ou solo estabilizado: análise de custos e alternativas de pavimentação para o litoral sul do estado do Rio Grande do Sul.** Universidade Federal do Rio Grande – FURG. 42^a RAPv. 16º ENACOR. Gramado/RS, 2013.

SABEDOT, S.; SUNDSTRON, M.G.; BÖER, S.C.; SAMPAIO, C.H.; DIAS, R.G.O.; RAMOS, C.G. **Caracterização e aproveitamento de cinzas da combustão de carvão mineral geradas em usinas termelétricas.** In: III Congresso Brasileiro de Carvão Mineral, Gramado. III Congresso Brasileiro de Carvão Mineral, 2011.

SANTOS, J. **Estabilização de uma argila laterítica do Distrito Federal para uso em rodovias de baixo volume de tráfego.** Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-127/04, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2004.

SECRETARIA DA INFRAESTRUTURA DO CEARÁ – SEINFRA. **Potência instalada de energia elétrica no ano de 2014 no estado do Ceará.** Disponível em: <<http://www.ceara.gov.br/?secretaria=SEINFRA&endereco=http://www.seinfra.ce.gov.br/>> Acesso em: julho/2014.

SILVA, N.I.W. da; CHIES, F.; ZWONOK, O. **Usos de cinzas de carvão na construção civil.** Anais 1º Encontro Nacional sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, 1997.

SILVA, N.I.W.da, CALAFARGE, L.M., CHIES, F., MALLMANN, J.E., ZWONOK, O. **Caracterização de Cinzas Volantes para Aproveitamento Cerâmico.** São Paulo, v. 45, n. 296, nov/dez, 1999.

SLIDEPLAYER. **Resistência à tração por compressão diametral.** Disponível em: <slideplayer.com.br> Acesso em: julho/2015.

SOUSA JÚNIOR, J.D.de. **Efeito da Energia de Compactação em Propriedades dos Solos Utilizados na Pavimentação do Estado do Ceará.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Ceará, Orientadora: Suelly Helena de Araújo Barroso. 2005.

SPENCE, R.J.S.; COOK, D.J. **Building materials in developing countries.** John Wiley & Sons Editors. 1ed., New York, 1983.

VILLAR, L.F.S.; CAMPOS, T.M.P.de; ZORNBERG, J.G. **Relationship between Tensile Strength as obtained by the Brazilian Test, Soil Suction, and Index Properties.** Proceedings of the Sixth Brazilian Symposium on Unsaturated Soils, Salvador, Brazil, 1-3 November, 2007.

VILLIBOR, D.F. **Estabilização granulométrica ou mecânica.** GRÁFICA EESC – USP, São Carlos, SP, 1982.

TENG JÚNIOR, C.T. **Estudo da influência do calcário cru e cinzas volantes nas propriedades físico-químicas e mecânicas do cimento portland produzido em Moçambique.** Universidade Eduardo Mondlane. Faculdade de Ciências. Departamento de Química. (2001).

TORQUATO E SILVA, S.A.; BASTOS, J.B.S.; SOARES, J.B. **Influência da aderência na análise de pavimentos asfálticos**. Universidade Federal do Ceará – UFC. 44ª RAPv. 18º ENACOR. Foz do Iguaçu/PR, 2015.

UBALDO, M.O. **Uso de cinzas de carvão da composição de uma cobertura de rejeitos de mineração**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

**ANEXO – ENSAIOS DE EXTRATOS LIXIVIADO E SOLUBILIZADO REALIZADO
NA CINZA VOLANTE PROVENIENTE DA TERMELÉTRICA
ENERGIA PECÉM**

RELATÓRIO DE ENSAIO N° 48843/2014-0
Processo Comercial N° 2357/2014-4

DADOS REFERENTES AO CLIENTE

Empresa solicitante:	Porto do Pecém Geração de Energia S/A
Endereço:	Rodovia CE-085, S/N - KM 37,5 CXPST 11 - Pecem - São Gonçalo do Amarante - Ceará - CEP: 62.670-000 .
Nome do Solicitante:	Renato Cruz

IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA:
Fly ASH UND 01 – Energia Pecém

Análise Solicitada
Caracterização de Resíduo segundo NBR 10004

Data da Coleta da Amostra
24/02/2014

Data de Entrada no Laboratório
28/02/2014 15:49

Data de Conclusão
25/03/2014

RESULTADOS ANALITICOS DA AMOSTRA

Fly ASH UND 01 – Energia Pecém

Coletor da Amostra: Germana (Bioagri – PE) - Bioagri Ambiental Ltda. A amostragem foi realizada com base na NBR 10007:2004 – Amostragem de Resíduos Sólidos

⇒ Resíduo - Massa Bruta (NBR 10004)

NBR 10004:2004 - Massa Bruta				
Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP - NBR 10004:2004
pH (Suspensão 1:1)		0 - 14	9,5	2,0 - 12,5 (b)
Sulfeto (como H ₂ S)	mg/kg	1	21	500 (c)
Porcentagem de Sólidos	% p/p	0,05	99,7	
Cianeto (como HCN)	mg/kg	0,1	0,3	250 (c)

⇒ Resíduo - Extrato Lixiviado (NBR 10005)

NBR 10005:2004 - Lixiviado - Parâmetros Inorgânicos				
Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP NBR 10004:2004
Arsênio	mg/L	0,01	0,187	1,0
Bário	mg/L	0,01	0,430	70,0
Cádmio	mg/L	0,001	0,013	0,5
Chumbo	mg/L	0,01	< 0,01	1,0
Cromo	mg/L	0,01	0,030	5,0
Fluoreto	mg/L	0,1	41,9	150
Mercúrio	mg/L	0,000075	< 0,00007	0,1
Prata	mg/L	0,01	< 0,01	5,0
Selênio	mg/L	0,008	0,595	1,0

NBR 10005:2004 - Lixiviado - Parâmetros Orgânicos				
Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP NBR 10004:2004
1,1-Dicloroetano	mg/L	0,001	< 0,001	3,0
1,2-Dicloroetano	mg/L	0,001	< 0,001	1,0
1,4-Diclorobenzeno	mg/L	0,001	< 0,001	7,5
2,4,5-T	mg/L	0,001	< 0,001	0,2
2,4,5-TP	mg/L	0,001	< 0,001	1,0
2,4,5-Triclorofenol	mg/L	0,001	< 0,001	400
2,4,6-Triclorofenol	mg/L	0,0005	< 0,0005	20,0
2,4-D	mg/L	0,0005	< 0,0005	3,0
2,4-Dinitrotolueno	mg/L	0,001	< 0,001	0,13
Aldrin + Dieldrin	mg/L	3E-5	< 3E-5	0,003
Benzeno	mg/L	0,001	< 0,001	0,5
Benzo(a)pireno	mg/L	5E-5	< 5E-5	0,07
Clordano (isômeros)	mg/L	0,0001	< 0,0001	0,02
Cloreto de Vinila	mg/L	0,001	< 0,001	0,5
Clorobenzeno	mg/L	0,001	< 0,001	100
Clorofórmio	mg/L	0,001	< 0,001	6,0
DDT (isômeros)	mg/L	0,0005	< 0,0005	0,2
Endrin	mg/L	0,0001	< 0,0001	0,06
Hexaclorobenzeno	mg/L	0,0005	< 0,0005	0,1
Hexaclorobutadieno	mg/L	0,001	< 0,001	0,5
Hexacloroetano	mg/L	0,001	< 0,001	3,0
3+4-Metilfenol (m+p-Cresol)	mg/L	0,002	< 0,002	200
Metoxicloro	mg/L	0,0005	< 0,0005	2,0
Nitrobenzeno	mg/L	0,0002	< 0,0002	2,0
2-Metilfenol (o-Cresol)	mg/L	0,001	< 0,001	200
Pentaclorofenol	mg/L	0,0005	< 0,0005	0,9
Piridina	mg/L	5	< 5	5,0
Tetracloroeto de Carbono	mg/L	0,001	< 0,001	0,2
Tetracloroetano	mg/L	0,001	< 0,001	4,0
Toxafeno	mg/L	0,0001	< 0,0001	0,5
Tricloroetano	mg/L	0,001	< 0,001	7,0
Heptacloro e Heptacloro Epóxido	mg/L	2E-5	< 2E-5	0,003

NBR 10005:2004 - Lixiviado - Parâmetros Orgânicos

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP NBR 10004:2004
Lindano (g-BHC)	mg/L	5E-5	< 5E-5	0,2
Metiletilcetona	mg/L	5	< 5	200

NBR 10005:2004 - Lixiviado

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP NBR 10004:2004
Tempo de Lixiviação	horas	---	18	16 - 20
Solução de Extração		---	1	
pH Final do Lixiviado		---	5,5	

⇒ Resíduo - Extrato Solubilizado (NBR 10006)
NBR 10006:2004 - Solubilizado - Parâmetros Inorgânicos

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP NBR 10004:2004
Alumínio	mg/L	0,01	1,8	0,2
Arsênio	mg/L	0,01	0,058	0,01
Bário	mg/L	0,01	0,262	0,7
Cádmio	mg/L	0,001	< 0,001	0,005
Chumbo	mg/L	0,01	< 0,01	0,01
Cianeto	mg/L	0,05	< 0,05	0,07
Cloreto	mg/L	5	28,7	250
Cobre	mg/L	0,005	< 0,005	2,0
Cromo	mg/L	0,01	0,075	0,05
Ferro	mg/L	0,01	0,043	0,3
Fluoreto	mg/L	0,1	7,8	1,5
Índice de Fenóis	mg/L	0,01	< 0,01	0,01
Manganês	mg/L	0,01	0,040	0,1
Mercúrio	mg/L	0,000075	< 0,00007	0,001
Nitrato (como N)	mg/L	1	< 1	10,0
Prata	mg/L	0,01	< 0,01	0,05
Selênio	mg/L	0,008	1,1	0,01
Sódio	mg/L	0,5	95,1	200
Sulfato	mg/L	50	552	250
Surfactantes (como LAS)	mg/L	0,1	0,15	0,5
Zinco	mg/L	0,01	< 0,01	5,0

NBR 10006:2004 - Solubilizado - Parâmetros Orgânicos

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP NBR 10004:2004
2,4,5-T	mg/L	0,001	< 0,001	0,002
2,4,5-TP	mg/L	0,001	< 0,001	0,03
2,4-D	mg/L	0,0005	< 0,0005	0,03
Aldrin + Dieldrin	mg/L	3E-5	< 3E-5	0,00003
Clordano (isômeros)	mg/L	0,0001	< 0,0001	0,0002
DDT (isômeros)	mg/L	0,0005	< 0,0005	0,002
Endrin	mg/L	0,0001	< 0,0001	0,0006
Hexaclorobenzeno	mg/L	0,0005	< 0,0005	0,001
Metoxicloro	mg/L	0,0005	< 0,0005	0,02
Toxafeno	mg/L	0,0001	< 0,0001	0,005
Heptacloro e Heptacloro Epóxido	mg/L	2E-5	< 2E-5	0,00003
Lindano (g-BHC)	mg/L	5E-5	< 5E-5	0,002

NBR 10006:2004 - Solubilizado

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos	VMP NBR 10004:2004
pH Final do Solubilizado	---	0-14	9,7	

CONTROLE DE QUALIDADE DO LABORATÓRIO
Controle de Qualidade - Mercúrio - Água
58544/2014-0 - Branco de Análise - Mercúrio Total - Água

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos
Mercúrio	µg/L	0,05	< 0,05

58545/2014-0 - Amostra Controle - Mercúrio Total - Água

Parâmetros	Quantidade Adicionada	Unidade	Resultado da Recuperação (%)	Faixa Aceitável de Recuperação (%)
Mercúrio	1	µg/L	88	80-120

Controle de Qualidade - VOC - Água
54915/2014-0 - Branco de Análise - VOC - Água

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos
1,1-Dicloroetano	µg/L	1	< 1
1,2-Dicloroetano	µg/L	1	< 1
1,4-Diclorobenzeno	µg/L	1	< 1
Benzeno	µg/L	1	< 1
Cloro de Vinila	µg/L	1	< 1
Clorobenzeno	µg/L	1	< 1
Clorofórmio	µg/L	1	< 1
Hexaclorobutadieno	µg/L	1	< 1
Tetracloro de Carbono	µg/L	1	< 1
Tetracloroetano	µg/L	1	< 1
Tricloroetano	µg/L	1	< 1

54916/2014-0 - Amostra Controle - VOC - Água

Parâmetros	Quantidade Adicionada	Unidade	Resultado da Recuperação (%)	Faixa Aceitável de Recuperação (%)
1,1-Dicloroetano	20	µg/L	100	70 - 130
Benzeno	20	µg/L	85	70 - 130
Tricloroetano	20	µg/L	90	70 - 130
Tolueno	20	µg/L	80	70 - 130
Clorobenzeno	20	µg/L	90	70 - 130

Recuperação dos Surrogates
54915/2014-0 - Branco de Análise - VOC - Água

Parâmetros	Quantidade Adicionada	Unidade	Resultado da Recuperação (%)	Faixa Aceitável de Recuperação (%)
Dibromofluorometano	20	%	105	70 - 130
p-Bromofluorbenzeno	20	%	83	70 - 130

54916/2014-0 - Amostra Controle - VOC - Água

Parâmetros	Quantidade Adicionada	Unidade	Resultado da Recuperação (%)	Faixa Aceitável de Recuperação (%)
Dibromofluorometano	20	%	103	70 - 130
p-Bromofluorbenzeno	20	%	84	70 - 130

Resíduo - Extrato Lixiviado (NBR 10005)

Parâmetros	Quantidade Adicionada	Unidade	Resultado da Recuperação (%)	Faixa Aceitável de Recuperação (%)
Dibromofluorometano	20	%	110	70 - 130
p-Bromofluorbenzeno	20	%	84	70 - 130

Controle de Qualidade - Mercúrio - Água
57083/2014-0 - Branco de Análise - Mercúrio Total - Água

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos
Mercúrio	µg/L	0,05	< 0,05

57084/2014-0 - Amostra Controle - Mercúrio Total - Água

Parâmetros	Quantidade Adicionada	Unidade	Resultado da Recuperação (%)	Faixa Aceitável de Recuperação (%)
Mercúrio	1	µg/L	102	80-120

Controle de Qualidade - Metais Totais - Água
58702/2014-0 - Branco de Análise - Metais Totais - Água

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos
Prata	µg/L	10	< 10
Alumínio	µg/L	10	< 10
Arsênio	µg/L	10	< 10
Bário	µg/L	10	< 10

58702/2014-0 - Branco de Análise - Metais Totais - Água

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos
Cádmio	µg/L	1	< 1
Cromo	µg/L	10	< 10
Cobre	µg/L	5	< 5
Ferro	µg/L	10	< 10
Sódio	µg/L	500	< 500
Selênio	µg/L	8	< 8
Zinco	µg/L	10	< 10
Manganês	µg/L	10	< 10

58703/2014-0 - Amostra Controle - Metais Totais - Água

Parâmetros	Quantidade Adicionada	Unidade	Resultado da Recuperação (%)	Faixa Aceitável de Recuperação (%)
Arsênio	0,1	mg/L	98	80 - 120
Cromo	0,1	mg/L	95	80 - 120
Cobalto	0,1	mg/L	97	80 - 120
Lítio	0,1	mg/L	106	80 - 120
Manganês	0,1	mg/L	97	80 - 120
Estrôncio	0,1	mg/L	103	80 - 120

Recuperação dos Surrogates
58702/2014-0 - Branco de Análise - Metais Totais - Água

Parâmetros	Quantidade Adicionada	Unidade	Resultado da Recuperação (%)	Faixa Aceitável de Recuperação (%)
Itrio (Metais Totais)	100	%	108	70 - 130

58703/2014-0 - Amostra Controle - Metais Totais - Água

Parâmetros	Quantidade Adicionada	Unidade	Resultado da Recuperação (%)	Faixa Aceitável de Recuperação (%)
Itrio (Metais Totais)	100	%	110	70 - 130

Resíduo - Extrato Solubilizado (NBR 10006)

Parâmetros	Quantidade Adicionada	Unidade	Resultado da Recuperação (%)	Faixa Aceitável de Recuperação (%)
Itrio (Metais Totais)	100	%	106	70 - 130

Controle de Qualidade - Metais Totais - Água
58758/2014-0 - Branco de Análise - Metais Totais - Água

Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados analíticos
Prata	µg/L	10	< 10
Alumínio	µg/L	10	< 10
Arsênio	µg/L	10	< 10
Bário	µg/L	10	< 10
Cádmio	µg/L	1	< 1
Cromo	µg/L	10	< 10
Cobre	µg/L	5	< 5
Ferro	µg/L	10	< 10
Sódio	µg/L	500	< 500
Selênio	µg/L	8	< 8
Zinco	µg/L	10	< 10
Manganês	µg/L	10	< 10

58759/2014-0 - Amostra Controle - Metais Totais - Água

Parâmetros	Quantidade Adicionada	Unidade	Resultado da Recuperação (%)	Faixa Aceitável de Recuperação (%)
Arsênio	0,1	mg/L	93	80 - 120
Cromo	0,1	mg/L	93	80 - 120
Cobalto	0,1	mg/L	95	80 - 120
Lítio	0,1	mg/L	113	80 - 120
Manganês	0,1	mg/L	96	80 - 120
Estrôncio	0,1	mg/L	105	80 - 120

Recuperação dos Surrogates
58758/2014-0 - Branco de Análise - Metais Totais - Água

Parâmetros	Quantidade Adicionada	Unidade	Resultado da Recuperação (%)	Faixa Aceitável de Recuperação (%)
------------	-----------------------	---------	------------------------------	------------------------------------

58758/2014-0 - Branco de Análise - Metais Totais - Água

Parâmetros	Quantidade Adicionada	Unidade	Resultado da Recuperação (%)	Faixa Aceitável de Recuperação (%)
Itrio (Metais Totais)	100	%	111	70 - 130

58759/2014-0 - Amostra Controle - Metais Totais - Água

Parâmetros	Quantidade Adicionada	Unidade	Resultado da Recuperação (%)	Faixa Aceitável de Recuperação (%)
Itrio (Metais Totais)	100	%	113	70 - 130

Resíduo - Extrato Lixiviado (NBR 10005)

Parâmetros	Quantidade Adicionada	Unidade	Resultado da Recuperação (%)	Faixa Aceitável de Recuperação (%)
Itrio (Metais Totais)	100	%	116	70 - 130

Metodologias:

As metodologias utilizadas pela BIOAGRI foram baseadas "SW 846 (USEPA 1986, Test Method for Evaluating Solid Waste Report Number 846, Washington, DC" e as referências:

Normas de Referência:

Norma NBR 10004:2004 da ABNT - Classificação de Resíduos Sólidos
 Norma NBR 10006:2004 da ABNT - Ensaio de Solubilização
 Norma NBR 10005:2004 da ABNT - Ensaio de Lixiviação

As determinações sobre os extratos do Solubilizado e Lixiviado foram realizadas com base nos seguintes métodos do Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater – 22th Edition – 2012

Métodos analíticos:

Sólidos Totais: POP PA 058 Rev.02

Cianeto (CFA): ISO 14403:2012

Mercúrio: EPA 245.7:2005

pH: POP PA 056 / USEPA 9045 D

Ânions: EPA 300.0:1993; 300.1:1999 e POP PA 032 - Rev. 08

Surfactantes: SMEWW 5540 C

Metais (ICP-OES): Determinação: SMWW 3120 B / Preparo: EPA 3010A:1992

Índice de Fenóis - POP PA 155 - Rev. 01

Cianetos: POP PA 060 / SMEWW 4500 CN F, EPA 9010 C, EPA 9013

Lixiviação: POP PA 062 / ABNT NBR 10005:2004

VOC - Água: USEPA 8260C, 5021A

VOC 2 - Lixiviado: POP PA 074 / USEPA 8260C, 5021A

Solubilização: POP PA 053 / ABNT NBR 10006:2004

Sulfeto: POP PA 065 / USEPA 9030, 9034

SVOC: USEPA 8270D e 3510C, SMEWW 6410B

Toxafeno: POP PA 093 / USEPA 505

Fluoreto: SMWW 4500 F- D

Massa Bruta - Observações dos parâmetros

(b) = Avaliação da Corrosividade - Item "a" do tópico 4.2.1.2 da NBR 10004:2004

(c) = Avaliação da reatividade - Item "e" do tópico 4.2.1.3 da NBR 10004:2004.

LQ*:

LQ = Limite de Quantificação da Amostra (LQ = LQM x fator de preparo da amostra x correção base seca, quando aplicável);

LQM = Limite de Quantificação do Método.

VMP:**

Valores Máximos Permitidos pela Norma ABNT NBR 10004:2004.

Nota 1:

Os resultados referem-se somente à amostra analisada. Este Relatório de Ensaio pode ser reproduzido por inteiro e sem nenhuma alteração.

Responsabilidade Os ensaios foram realizados na unidade da Bioagri Ambiental Ltda. - Matriz, situada na Rua Aljovil Martini, 177/201,

Técnica: Bairro Dois Córregos, Cep. 14420-833, Piracicaba/SP, registrada no CRQ 4ª Região sob nº 16082-F e responsabilidade técnica do profissional José Carlos Moretti, CRQ nº 04107238, 4ª Região.

Informações Complementares: **Classificação de resíduos sólidos: As opiniões e interpretações expressas abaixo não fazem parte do escopo da acreditação deste laboratório.**

Um resíduo é classificado como Classe I (Perigoso) quando um ou mais parâmetros do Lixiviado e/ou Massa Bruta estiverem acima dos valores máximos permitidos pelos anexos da NBR 10004.

Um resíduo é classificado como Classe II A (Não Inerte) quando um ou mais parâmetros do solubilizado estiverem acima dos valores máximos permitidos pelos Anexo G da NBR 10004.

Um resíduo é classificado como Classe II B (Inerte) quando todos os parâmetros, tanto da Massa Bruta quanto dos ensaios de solubilização e lixiviação estiverem abaixo dos valores máximos permitidos pelos anexos da NBR 10004.

Massa Bruta: Comparando-se os resultados obtidos com os Valores Máximos Permitidos pela NBR 10004:2004 podemos afirmar que: Os parâmetros satisfazem os limites permitidos.

Solubilizado: Comparando-se os resultados obtidos com os Valores Máximos Permitidos pela NBR 10004:2004 - Anexo G podemos afirmar que: O(s) parâmetro(s) Alumínio, Arsênio, Cromo, Fluoreto, Selênio, Sulfato ultrapassam os limites máximos permitidos.

Lixiviado: Comparando-se os resultados obtidos com os Valores Máximos Permitidos pela NBR 10004:2004 - Anexo F podemos afirmar que: O(s) parâmetro(s) satisfazem os limites permitidos.

Em função dos resultados obtidos, a amostra de resíduo deve ser classificada como Classe II A - Resíduo Não Inerte.

Obs: A Classificação do resíduo foi efetuada baseando-se somente nos parâmetros analisados solicitados pelo cliente.

Revisores

Débora Fernandes da Silva
Renato Augusto Duarte Gava
Joseane Maria Bulow
Rogério Caldorin
Guilherme Aguiar
Fábio Luís Silva
Marcus Vinicius Nascimento de Lima

Chave de Validação: c78b0571acd939a44c25dfd61168ee0e



Juliana Bombasaro
Controle de Qualidade
CRQ 04469985 - 4ª Região